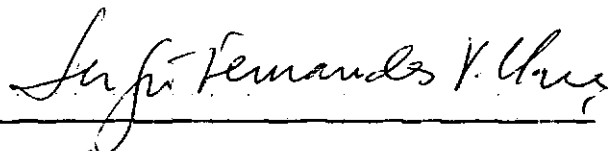


ANÁLISE DE TENSÕES PRIMÁRIAS E SECUNDÁRIAS  
EM SISTEMAS DE TUBULAÇÃO

Eurico Dias Rodrigues

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS  
DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO  
RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A  
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (M.Sc.) EM ENGENHARIA  
CIVIL.

Aprovada por:

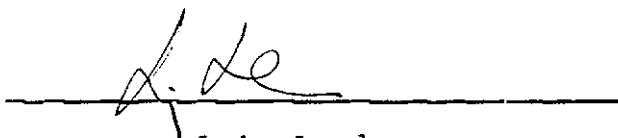


Sérgio Fernandes Villaza

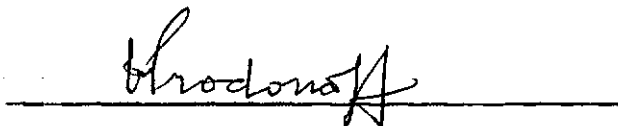
(Presidente)



Humberto Lima Soriano



Luiz Landau



Victor Prodonoff

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

FEVEREIRO DE 1987

RODRIGUES, EURICO DIAS

Análise de tensões primárias e secundárias em sistemas de tubulação (Rio de Janeiro), 1987

VI, 141p. 29,7cm (COPPE-UFRJ, M.Sc., Engenharia Civil, 1987

Tese - Univ. Fed. Rio de Janeiro - COPPE

1. Flexibilidade de Tubulação I. COPPE/UFRJ II. Título (série).

AGRADECIMENTOS

Aos Professores Sérgio Fernandes Villaça e Humberto Lima Soriano pela orientação deste trabalho.

Aos demais professores da COPPE pelos ensinamentos recebidos.

Ao desenhista projetista Luiz Augusto de Souza Pires pela colaboração neste trabalho.

Aos meus amigos, que de alguma forma colaboraram.

Aos meus pais, por tudo.

À minha esposa, que tanto me incentivou para a conclusão deste trabalho.

Resumo da Tese Apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.).

ANÁLISE DE TENSÕES PRIMÁRIAS E SECUNDÁRIAS  
EM SISTEMAS DE TUBULAÇÃO

Eurico Dias Rodrigues

Fevereiro - 1987

Orientador: Sérgio Fernandes Villaça

Programa: Engenharia Civil

É feita uma análise de tensões estáticas em um sistema de tubulação e enfatizada a importância da separação das tensões primárias e secundárias. Ênfase especial é dada na análise das tensões secundárias e no procedimento adotado na Norma ANSI B 31.3 da American National Standard Code for Pressure Piping para a determinação da tensão efetiva. É apresentado um Programa em linguagem BASIC para determinar tensões secundárias, onde os principais elementos especiais existentes num sistema de tubulação são considerados. Finalmente é explicado como os programas existentes para a determinação das tensões em sistemas de tubulação que não fazem a separação das tensões primárias e secundárias podem ser utilizados para calcular tensões de acordo com a Norma ANSI B 31.3.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

## PIPING SYSTEMS PRIMARY AND SECONDARY STRESS ANALYSIS

Eurico Dias Rodrigues

February - 1987

Chairman: Sérgio Fernandes Villaça

Department: Civil Engineering

It is presented a static stress analysis for a piping system and it is emphasized how it is important the distinction between primary and secondary stresses. Particular emphasis is done on secondary stress analysis and on ANSI B 31.3 (American National Standard Code for Pressure Piping) criteria for the determination of the effective stress. It is presented a computer program, in BASIC language, for the determination of secondary stresses, where the principal special elements of a piping systems are considered. Finally it is explained how the usual programs for determination of stresses in piping systems, which don't make the distinction between primary and secondary stresses may be used to determine the stresses according to the ANSI B 31.3.

## ÍNDICE

## I - ASPECTOS GERAIS

1.1 - Introdução .....	1
1.2 - Relaxamento espontâneo de tensões .....	2
1.3 - Esforços atuantes em um sistema de tubulação ..	4
1.4 - Cálculo das tensões secundárias utilizando o teorema de Castigliano .....	5

## II - ANÁLISE DAS TENSÕES PRIMÁRIAS

2.1 - Critério de resistência adotado .....	16
2.2 - Tensões admissíveis .....	20
2.3 - Pressão interna .....	22
2.4 - Peso próprio e sobrecargas .....	23
2.5 - Procedimento para determinação da espessura co- mercial .....	24

## III - ANÁLISE DAS TENSÕES SECUNDÁRIAS

3.1 - Introdução .....	29
3.2 - Influências geométricas .....	31
3.3 - Condições de projeto .....	35
3.4 - Tensões secundárias e reações .....	38

## IV - PROGRAMA PARA CÁLCULO DAS TENSÕES SECUNDÁRIAS

4.1 - Descrição do Programa .....	46
4.2 - Dados de entrada .....	55

## V - APLICAÇÕES

5.1 - Primeira aplicação .....	58
5.2 - Segunda aplicação .....	66
5.3 - Terceira aplicação .....	75
5.4 - Quarta aplicação .....	88
5.5 - Quinta aplicação .....	97

## VI - ASPECTOS FINAIS

6.1 - Determinação das tensões secundárias .....	104
6.2 - Determinação das tensões primárias .....	104
6.3 - Determinação das reações de apoio .....	105
6.4 - Como melhorar a flexibilidade .....	105

APÊNDICE - LISTAGEM DO PROGRAMA .....	106
---------------------------------------	-----

SIMBOLOGIA .....	139
------------------	-----

BIBLIOGRAFIA .....	141
--------------------	-----

## I - ASPECTOS GERAIS

### 1.1- INTRODUÇÃO

O cálculo mecânico de tubulação em instalações industriais é regido pela Norma ANSI B 31.3 do American National Standard Code for Pressure Piping. A tubulação é considerada como um elemento mecânico submetido a diversos esforços e transmitindo outros esforços aos seus suportes e pontos de fixação.

O ponto fundamental em que se baseia o cálculo de tubulação pela citada Norma, é que esses diversos esforços a que os tubos estão sujeitos se dividem em dois grandes grupos: o grupo de esforços que provocam tensões primárias e o dos que provocam tensões secundárias.

Evidentemente, esses esforços estão agindo simultaneamente na tubulação, entretanto, como veremos adiante, o comportamento deles é diferente, e, baseado nessa diferença, são fornecidas tensões admissíveis diferentes para tensões primárias e secundárias. Será então imperioso separar os esforços que provocam tensões primárias dos que provocam tensões secundárias e fazer então dois cálculos distintos, que como veremos, serão um deles de determinação mecânica (primárias) e o outro de verificação (secundárias).

No que concerne ao cálculo das tensões secundárias, temos no capítulo IV um programa de computador que, utilizando o método dos deslocamentos, determina de acordo com a Norma ANSI B 31.3 a tensão efetiva que deve ser comparada à tensão admissível às tensões secundárias.



## 1.2- RELAXAMENTO ESPONTÂNEO DE TENSÕES

O fenômeno do relaxamento espontâneo de tensões é característico das tensões secundárias. Ele acontece da seguinte maneira:

Inicialmente vamos supor o sistema de tubulação da figura (I.1) e analisar o que ocorre com um determinado trecho reto de tubo (AB), montado a uma temperatura inicial  $T_0$  e submetido a um aumento  $\Delta T$  devido ao fluido conduzido estar em alta temperatura.

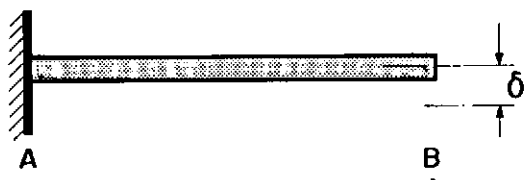


Figura (I.1) - Deslocamento imposto ao tubo AB

O deslocamento  $\delta$  é o deslocamento final resultante do resto do sistema sobre o trecho AB. O gráfico  $\sigma \times t$  (tensão x tempo) do ponto mais tensionado do trecho toma o aspecto da figura (I.2).

Ao final de um certo tempo, as tensões internas provocam deformações permanentes que aliviam  $\sigma_t$ , e fazem com que essa tensão de trabalho caia um pouco. Finalmente, quando o sistema pára de operar a seção B volta a sua posição original (o resto do sistema "puxa" a seção B), e como já houve deformação permanente no tubo, haverá uma tensão residual nega-

tiva. Essa tensão é numericamente igual à queda provocada pelo relaxamento de tensões neste primeiro ciclo de trabalho, conforme mostra a figura (I.3)

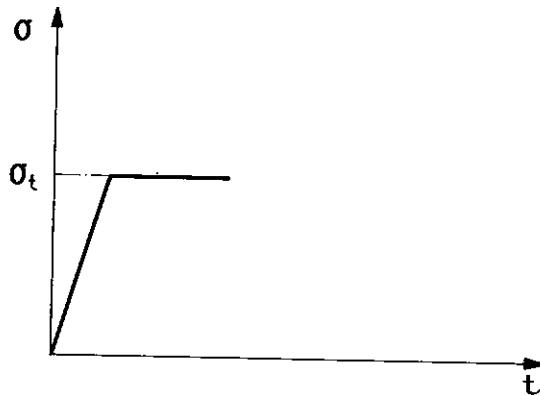


Figura (I.2) - Gráfico  $\sigma \times t$

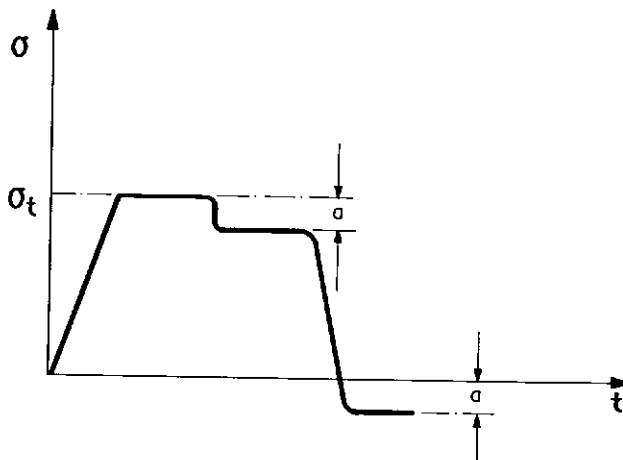


Figura (I.3) - Primeiro ciclo do alívio de tensões

Repetindo-se vários ciclos, verifica-se que o relaxamento espontâneo de tensões vai diminuindo até não mais ocorrer ao final de um determinado número de ciclos (variável para cada caso). O gráfico  $\sigma \times t$  toma o aspecto da figura (I.4).

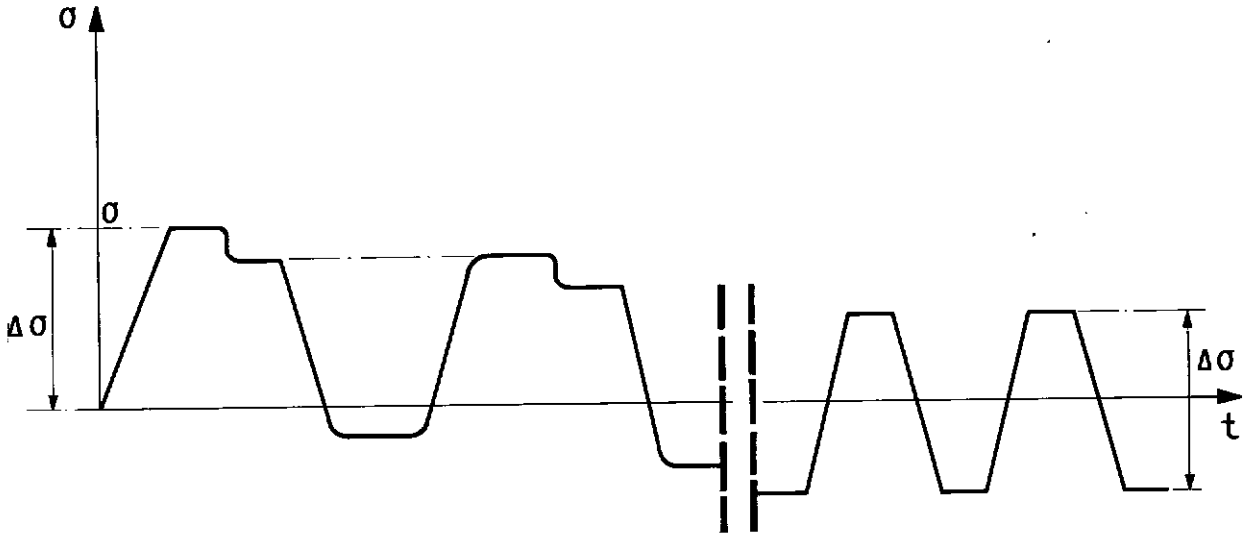


Figura (I.4) - Relaxamento espontâneo de tensões

Esse alívio de tensões só pode ser admitido em materiais dúteis, como o aço carbono e a maioria dos aços inoxidáveis e aços liga.

A diferença entre a tensão máxima e mínima de cada ciclo permanece constante e igual ao  $\sigma_t$  calculado no primeiro ciclo. Essa diferença de tensões é denominada pela Norma ANSI B 31.3 "stress-range".

### 1.3- ESFORÇOS ATUANTES EM UM SISTEMA DE TUBULAÇÃO

Dentre os carregamentos mais importantes que atuam num sistema de tubulação, ou seja, que produzem tensões consideráveis e que ocorram frequentemente em instalações industriais destacam-se: pressão interna; peso próprio; sobre-

cargas diversas; esforços provenientes de dilatação térmica e de movimentos provocados por agentes externos ao sistema.

Os dois últimos provocam tensões secundárias e os outros tensões primárias. É fácil perceber que esforços do tipo de sobrecargas não sofrem nenhum alívio de tensões, com quaisquer deformações permanentes que possam ocorrer, visto que a sobrecarga estará sempre atuando com seu valor original.

Como pudemos observar, a diferença básica entre as tensões primárias e as secundárias é que as primeiras não dependem do tempo, ou seja, não sofrem nenhum relaxamento de tensões, dependendo exclusivamente do esforço que lhe deu origem.

Baseado nessa diferença de comportamento, a Norma ANSI B 31.3 fornece tensões admissíveis diferentes para as tensões primárias e secundárias, e todo cálculo de tensões em tubos deve ser feito separando-se essas tensões.

#### 1.4- CÁLCULO DAS TENSÕES SECUNDÁRIAS UTILIZANDO O TEOREMA DE CASTIGLIANO

##### 1.4.1- MÉTODO DE CÁLCULO

O método utiliza uma matriz de flexibilidade formada a partir da aplicação do teorema de Castigliano. Por esse método, calculam-se as incógnitas hiperestáticas (forças e momentos) e de posse delas determina-se o valor das forças e momentos em qualquer ponto do sistema, o valor dos deslocamentos e o valor das tensões. Utiliza-se portanto o método das forças.

Pode-se aplicar esse método para quaisquer configurações, sem limite para número de ramos, restrições intermediárias ou pontos de fixação.

#### 1.4.2 - TEOREMA DE CASTIGLIANO

O teorema de Castigliano relaciona a energia de deformação absorvida pela estrutura, o esforço e seu respectivo deslocamento, em uma estrutura com comportamento elástico linear. Enuncia o teorema que o deslocamento em qualquer ponto P de uma estrutura é igual a derivada parcial da energia de deformação absorvida pela estrutura em relação ao esforço associado a esse deslocamento.

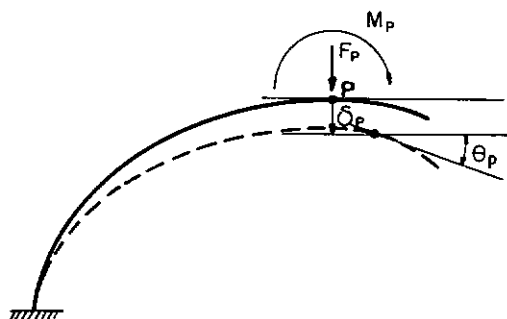


Figura (I.5) - Esforços x deslocamentos

Em relação à figura (I.5) teremos:

$$\delta_p = \partial U / \partial F_p \quad (I.1)$$

$$\theta_p = \partial U / \partial M_p \quad (I.2)$$

Para tubulações usuais, a contribuição das forças diretas (tração-compressão e cisalhamento) é muito pequena e pode ser desconsiderada. A expressão então da energia de deformação, em função dos momentos fletores e do momento torsor ficará como indicado na equação (I.3).

$$U = \int_A^B \left( \frac{K \cdot M_b^2}{2 \cdot E_n \cdot I_n} + \frac{K \cdot M_{bt}^2}{2 \cdot E_n \cdot I_n} + \frac{M_t^2}{2 \cdot G_n \cdot J_n} \right) dl \quad (I.3)$$

onde

$M_t$  - momento torsor agindo na seção considerada

$M_b$  - momento fletor no plano da estrutura na região considerada

$M_{bt}$  - momento fletor perpendicular ao  $M_b$

$K$  - fator de flexibilidade ( a ser definido no capítulo III)

$E_n$  - módulo de elasticidade

$G_n$  - módulo transversal de elasticidade

$I_n$  - momento de inércia da seção transversal em relação a um eixo passando pelo centro da seção

$J_n$  - momento de inércia polar da seção transversal

E usando as relações (I.4) e (I.5) e considerando o coeficiente de Poisson  $\nu = 0,3$  chegamos à expressão (I.6).

$$G_n = \frac{E_n}{2(\nu+1)} \quad (I.4)$$

$$J_n = 2 I_n \quad (I.5)$$

$$U = \int_A^B \left( \frac{K.M_b^2}{2 E_n \cdot I_n} + \frac{K.M_{bt}^2}{2 E_n \cdot I_n} + \frac{1,3 M_t^2}{2 E_n \cdot I_n} \right) dl \quad (I.6)$$

Substituindo nas equações (I.1) e (I.2) e efetuando as derivações chegamos às equações (I.7).

$$\begin{aligned} \delta_p &= \int_A^B \left( \frac{K.M_b}{E_n \cdot I_n} \frac{\partial M_b}{\partial F_p} + \frac{K.M_{bt}}{E_n \cdot I_n} \frac{\partial M_{bt}}{\partial F_p} + \frac{1,3 M_t}{E_n \cdot I_n} \frac{\partial M_t}{\partial F_p} \right) dl \\ \theta_p &= \int_A^B \left( \frac{K.M_b}{E_n \cdot I_n} \frac{\partial M_b}{\partial M_p} + \frac{K.M_{bt}}{E_n \cdot I_n} \frac{\partial M_{bt}}{\partial M_p} + \frac{1,3 M_t}{E_n \cdot I_n} \frac{\partial M_t}{\partial M_p} \right) dl \end{aligned} \quad (I.7)$$

Para retirar do integrando o produto  $E_n \cdot I_n$ , define-se o coeficiente de rigidez  $Q$ , visto que o diâmetro das tubulações normalmente é constante de trechos em trechos.

$$Q = \frac{E \cdot I}{E_n \cdot I_n} \quad (I.8)$$

onde

- $E_n$  e  $I_n$  são os valores do módulo de elasticidade e momento de inércia do trecho em questão
- $E$  e  $I$  são esses valores num trecho tomado como base em que  $Q=1$ .

Introduzindo  $Q$  nas equações (I.7) chegamos nas equações (I.9)

$$EI \delta_p = \int_A^B \left( KQM_b \frac{\partial M_b}{\partial F_p} + KQM_{bt} \frac{\partial M_{bt}}{\partial F_p} + 1,3M_t \frac{\partial M_t}{\partial F_p} \right) dl \quad (I.9)$$

$$EI \theta_p = \int_A^B \left( KQM_b \frac{\partial M_b}{\partial M_p} + KQM_{bt} \frac{\partial M_{bt}}{\partial M_p} + 1,3M_t \frac{\partial M_t}{\partial M_p} \right) dl$$

#### 1.4.3- DEDUÇÃO DO MÉTODO PARA UMA TUBULAÇÃO PLANA COM DUAS ANCORAGENS SEM RESTRIÇÕES INTERMEDIÁRIAS

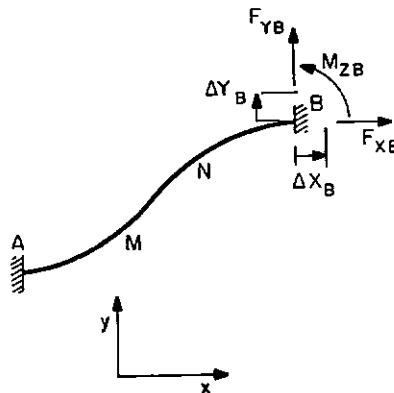


Figura (I.6) - Sistema plano com duas ancoragens



Caso a extremidade B fosse livre de se deslocar, apareceriam então as dilatações provocadas por uma diferença de temperatura  $\Delta T$  (I.10).

$$\begin{aligned}\Delta X_B &= e (X_B - X_A) \\ \Delta Y_B &= e (Y_B - Y_A)\end{aligned}\quad (I.10)$$

onde

- $(X_A, Y_A)$ ,  $(X_B, Y_B)$  são as coordenadas dos pontos extremos
- $e$  é a dilatação unitária correspondente à variação de temperatura  $\Delta T$

Para trazermos o ponto B para a posição original teremos que impor os deslocamentos mostrados nas relações (I.11).

$$\begin{aligned}\delta_{XB} &= - \Delta X_B \\ \delta_{YB} &= - \Delta Y_B \\ \theta_{ZB} &= 0\end{aligned}\quad (I.11)$$

A última igualdade expressa a condição que o carregamento  $\Delta T$  não provoca nenhuma rotação na extremidade livre. Os esforços  $F_{XB}$ ,  $F_{YB}$  e  $M_{ZB}$ , que são as incógnitas hiperestáticas, são calculados a partir do teorema de Castigliano. O transporte para qualquer ponto do sistema de coordenadas  $(X, Y)$ , é feito através das equações (I.12).

$$F_X = F_{XB}$$

$$F_Y = F_{YB} \quad (I.12)$$

$$M_Z = M_{ZB} - F_{XB}(Y_B - Y) + F_{YB}(X_B - X)$$

Aplicando o teorema de Castigliano e lembrando que  $M_{bt}$  e  $M_t$  são nulos e o momento  $M_b$  é o próprio  $M_Z$  das equações (I.12) chegamos às equações (I.13).

$$EI\theta_x = \int_A^B KQM_b \frac{\partial M_b}{\partial M_{ZB}} dl$$

$$0 = \int_A^B KQ \left[ M_{ZB} - F_{XB}(Y_B - Y) + F_{YB}(X_B - X) \right] dl \quad (I.13A)$$

$$EI\delta_{XB} = \int_A^B KQM_b \frac{\partial M_b}{\partial F_{XB}} dl$$

$$-EI\Delta X_B = \int_A^B KQ \left[ M_{ZB} - F_{XB}(Y_B - Y) + F_{YB}(X_B - X) \right] (Y - Y_B) dl \quad (I.13B)$$

$$EI\delta_{YB} = \int_A^B KQM_b \frac{\partial M_b}{\partial F_{YB}} dl$$

$$-EI\Delta Y_B = \int_A^B KQ \left[ M_{ZB} - F_{XB}(Y_B - Y) + F_{YB}(X_B - X) \right] (X_B - X) dl \quad (I.13C)$$

Resolvendo o sistema formado pelas equações de (I.13) retiramos os valores de  $M_{ZB}$ ,  $F_{XB}$  e  $F_{YB}$  e por meio das equações (I.12) podemos saber as forças e os momentos em qualquer ponto do sistema. A tensão final para cada ponto será a conseguida aplicando-se a fórmula (I.14).

$$S_E = \frac{i_i M_z}{Z} \quad (I.14)$$

onde

- $i_i$  - fator de intensificação de tensões no plano  
(definido no capítulo III)
- $Z$  - módulo de resistência

#### 1.4.4- EXTENSÃO DO MÉTODO PARA UMA TUBULAÇÃO PLANA RAMIFICADA

Nesse caso, se houver três ancoragens, as incógnitas hiperestáticas serão seis, e teremos que resolver agora um sistema de seis equações. Usando raciocínio análogo, vamos considerar livres as extremidades B e C.

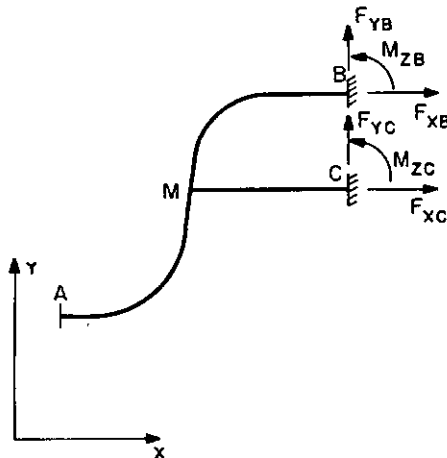


Figura (I.7) - Sistema plano ramificado

$$\begin{aligned}
\Delta X_B &= e (X_B - X_A) \\
\Delta X_C &= e (X_C - X_A) \\
\Delta Y_B &= e (Y_B - Y_A) \\
\Delta Y_C &= e (Y_C - Y_A)
\end{aligned}
\tag{I.15}$$

Os deslocamentos serão os mostrados nas relações (I.16).

$$\begin{aligned}
\delta_{XB} &= - \Delta X_B \\
\delta_{XC} &= - \Delta X_C \\
\delta_{YB} &= - \Delta Y_B \\
\delta_{YC} &= - \Delta Y_C \\
\theta_{ZB} &= \theta_{ZC} = 0
\end{aligned}
\tag{I.16}$$

Agora, a expressão da energia será composta de três parcelas, referentes aos trechos AM, MC e MB, pois a equação que nos dá o momento fletor  $M_b$  será diferente nesses trechos.

$$\begin{aligned}
MB - M_b &= M_Z = M_{ZB} - F_{XB}(Y_B - Y) + F_{YB}(X_B - X) \\
MC - M_b &= M_Z = M_{ZC} - F_{XC}(Y_C - Y) + F_{YC}(X_C - X) \\
AM - M_b &= M_Z = M_{ZB} - F_{XB}(Y_B - Y) + F_{YB}(X_B - X) + M_{ZC} - F_{XC}(Y_C - Y) + F_{YC}(X_C - X)
\end{aligned}
\tag{I.17}$$

Aplicando o teorema de Castigliano para os seis deslocamentos, obteremos um sistema de seis equações, que após resolvido, nos dará os valores das incógnitas hiperestáticas. O transporte para qualquer ponto do sistema é feito pelas equações da estática, de maneira análoga ao item anterior. Também as tensões em cada ponto são calculadas de modo análogo, aplicando a fórmula (I.14).

#### 1.4.5- EXTENSÃO DO MÉTODO PARA INCLUSÃO DE RESTRIÇÕES INTERMEDIÁRIAS

Suponhamos o sistema de tubulação esquematizado a seguir na figura (I.8). Se a guia localizada no ponto C for de superfície, estarão impedidos o deslocamento no sentido do eixo x e a rotação em torno do eixo z. Logo irão aparecer no ponto C apenas duas incógnitas hiperestáticas, que são  $F_{XC}$  e  $M_{ZC}$ .

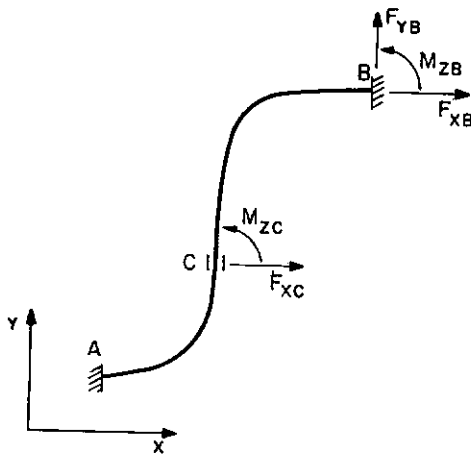


Figura (I.8) - Sistema com restrição intermediária

Usando raciocínio análogo, vamos supor os pontos B e C como livres. Os deslocamentos associados às incógnitas hiperestáticas serão os mostrados nas relações (I.18).

$$\begin{aligned}
 \delta_{XB} &= -\Delta X_B \\
 \delta_{YB} &= -\Delta Y_C \\
 \theta_{ZB} &= 0 \\
 \delta_{XC} &= -\Delta X_C \\
 \theta_{ZC} &= 0
 \end{aligned}
 \tag{I.18}$$

Temos agora que aplicar o teorema de Castigliano para esses cinco deslocamentos, e obter um sistema de cinco equações. A equação do momento  $M_b$ , assim como no caso anterior, será diferente para os trechos AC e CB.

$$\begin{aligned} \text{CB} - M_b &= M_Z = M_{ZB} - F_{XB}(Y_B - Y) + F_{YB}(X_B - X) \\ \text{AC} - M_b &= M_Z = M_{ZB} - F_{XB}(Y_B - Y) + F_{YB}(X_B - X) + M_{ZC} - F_{XC}(Y_C - Y) \end{aligned} \quad (\text{I.19})$$

Após a resolução do sistema de equações, podemos determinar pela estática, assim como nos casos anteriores, os esforços em qualquer outro ponto do sistema.

Se desejássemos saber o valor do deslocamento  $\Delta Y_C$ , teríamos que incluir na fórmula do momento no trecho AC a parcela  $+F_{YC}(X_C - X)$ . Com isso conseguiríamos mais uma equação quando aplicamos o teorema, e poderíamos determinar  $\Delta Y_C$ . O valor de  $F_{YC}$  não é incôgnita ( $F_{YC}=0$ ).

#### 1.4.6- EXTENSÃO DO MÉTODO PARA UMA TUBULAÇÃO QUALQUER

A diferença básica do sistema espacial para o plano é o número de incôgnitas hiperestáticas, que no caso espacial é de seis por ancoragem. Além disso, para se aplicar o teorema de Castigliano no caso tridimensional, teremos que obter as equações dos três momentos ( $M_b, M_{bt}$  e  $M_t$ ) em função das incôgnitas hiperestáticas, para cada trecho considerado. Portanto todo o procedimento é análogo, só que mais trabalhoso. A tensão efetiva  $S_E$  será calculada como mostra a equação (III.2).

## II- ANÁLISE DAS TENSÕES PRIMÁRIAS

### 2.1- CRITÉRIO DE RESISTÊNCIA ADOTADO

Considerando um elemento infinitesimal localizado em um tubo sujeito a diversos carregamentos, teremos as componentes de tensão mostradas na figura (II.1).

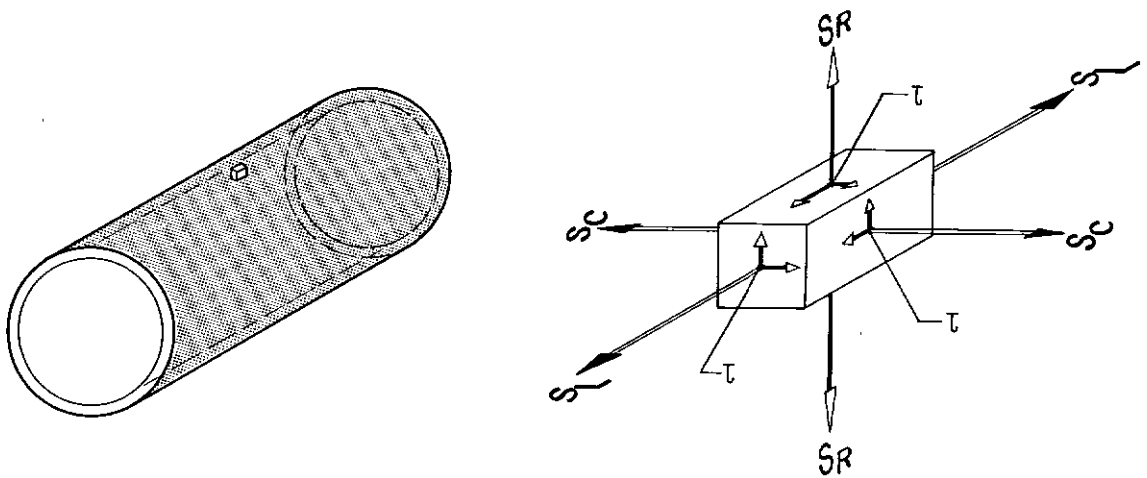


Figura (II.1) - Componentes de tensão

A Resistência dos Materiais desenvolveu várias teorias para relacionar a ruptura de um material com a ação de várias tensões simultâneas combinadas. Para os materiais dúteis a teoria que melhor se aplica é a de von Mises. Segundo essa teoria, as três tensões principais influenciam na ruptura do material, e esta ocorre quando a tensão equivalente às tensões combinadas for maior que um determinado valor. Para a determinação da tensão equivalente é usada a expressão (II.1), em fun-

ção das tensões principais,

$$S_E = \sqrt{\frac{2}{2}} \cdot \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2} \quad (II.1)$$

A teoria que é adotada pela Norma ANSI B 31.3 para materiais dúteis, é a denominada "teoria do cisalhamento máximo", de Guest-Tresca, que leva a resultados bem próximos da de von Mises, é mais conservativa e mais fácil de se trabalhar. Por essa teoria, a tensão equivalente é dada pela expressão (II.2), também em função das tensões principais.

$$S_E = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (II.2)$$

A expressão da tensão equivalente em função de tensões que não sejam as principais é mostrada na expressão (II.3)

$$S_E = \sqrt{4S_t^2 + (S_{\max} - S_{\min})^2} \quad (II.3)$$

onde

- $S_{\max}$  e  $S_{\min}$  são tensões normais máxima e mínima atuando em direções perpendiculares entre si e  $S_t$  é a tensão de cisalhamento nessas direções.

Para materiais não dúteis, a teoria de ruptura adotada é a de Rankine, onde simplesmente se compara a máxima tensão normal com a tensão admissível a fim de se fazer o dimensionamento, ou seja, a tensão equivalente seria apenas a



tensão  $\sigma_1$  como mostra a expressão (II.4).

$$S_E = \sigma_1 \quad (\text{II.4})$$

No estudo das tensões primárias, as tensões de cisalhamento são muito pequenas em relação às tensões normais, e por isso são desprezadas. Quanto à tensão principal  $S_R$  (tensão radial), ela é causada exclusivamente pela pressão interna, e é calculada pela expressão (II.5).

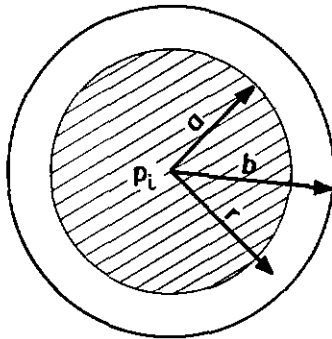


Figura (II.2) - Seção reta do tubo

$$S_R = \frac{a^2}{b^2 - a^2} \left( 1 - \frac{b^2}{r^2} \right) p_i \quad (\text{II.5})$$

Da figura (II.2) tem-se:

$$\text{Para } r=a \quad - \quad S_R = -p_i \quad (\text{compressão})$$

$$\text{Para } r=b \quad - \quad S_R = 0$$

Para os casos normais essa tensão é muito menor que  $S_C$  e  $S_L$  e por isso pode ser desprezada. Resta-nos então o estado tensional mostrado na figura (II.3).

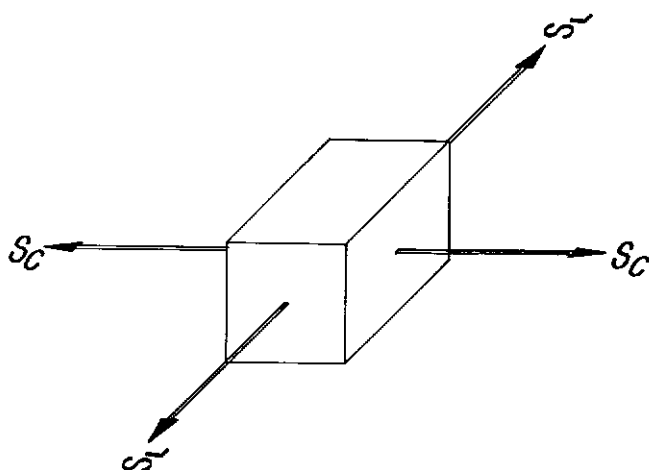


Figura (II.3) - Estado tensional final

Aplicando o critério do cisalhamento máximo, para determinar a tensão equivalente, lembrando que consideramos  $S_t$  e  $S_R$  desprezíveis, teremos: se a tensão máxima for  $S_C$ ,

$$S_E = S_C \quad (\text{II.6a})$$

e, caso a tensão máxima seja  $S_L$ ,

$$S_E = S_L \quad (\text{II.6b})$$

De acordo com esse resultado, chegamos a conclusão que para o caso em estudo, os critérios de Guest-Tresca e Rankine se confundem, ou seja, basta calcularmos  $S_C$  e  $S_L$ , verificarmos qual é a maior e compararmos com a tensão admissível.

## 2.2 - TENSÕES ADMISSÍVEIS

O valor tabelado pela Norma ANSI B 31.3 para cada temperatura e material, é o valor mínimo de uma série de valores, conforme mostrado na figura (II.4) e relações (II.7), onde:

$S_{ADM}$  - Tensão admissível básica a quente

$T_{df}$  - Tensão mínima que causa uma deformação por fluência de 1%, ao fim de 100000 horas, a quente.

$T_{dfm}$  - Tensão média que causa uma deformação por fluência de 1%, ao fim de 100000 horas, a quente.

$T_{rf}$  - Tensão mínima que causa a ruptura do material, em consequência de deformação por fluência, ao fim de 100000 horas, a quente.

$$S_{ADM} \left\{ \begin{array}{ll} \sigma_R/3 & \text{a frio} \\ \sigma_R/3 & \text{a quente} \\ 2/3 \sigma_y & \text{a frio} \\ 2/3 \sigma_y & \text{a quente} \\ T_{df} \\ 0,67 T_{dfm} \\ 0,8 T_{rf} \end{array} \right. \quad (II.7)$$

As principais notas existentes na referida Norma, no que concerne às tensões admissíveis básicas, são as seguintes:

- Se o tubo for fabricado com costura, a Norma já tabela o valor multiplicado pela eficiência de solda.

- Para esforços estáticos e permanentes de cisalhamento puro e de torção, considerar 80% de  $S_{ADM}$ .
- Para operações anormais, de curta duração, inclusive teste hidrostático, a Norma permite:
  - 1,33  $S_{ADM}$  - esforços que atuem durante até 10 horas seguidas, com o máximo de 100 horas por ano.
  - 1,20  $S_{ADM}$  - esforços que atuem durante até 50 horas seguidas, com o máximo de 500 horas por ano.

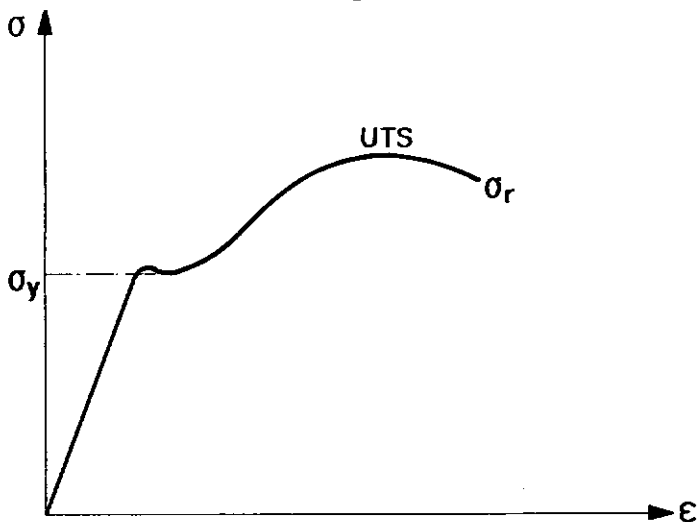


Figura (II.4) - Gráfico  $\sigma \times \epsilon$

As tensões admissíveis que são retiradas da Norma, são denominadas tensões admissíveis básicas. São usadas diretamente para o dimensionamento pelas tensões primárias. No cálculo da tensão admissível às tensões secundárias é usada uma fórmula em função dessas tensões básicas e de um fator que leva em conta o número de ciclos de trabalho, conforme será mostrado no capítulo III.

### 2.3- PRESSÃO INTERNA

Além da tensão radial, que é de compressão na parede do tubo e que já foi mencionada anteriormente, a pressão interna provoca tensão circunferencial e tensão longitudinal.

A tensão circunferencial é a que produziria a ruptura do tubo segundo uma geratriz. Sua determinação pode ser feita utilizando-se a equação geral das membranas, chegando-se a expressão (II.8).

$$S_C = p_i \cdot r / t \quad (II.8)$$

Esse resultado é baseado na consideração da distribuição uniforme da tensão  $S_C$  ao longo da espessura. Na realidade isso não ocorre, mas para relações  $r/t$  maiores que 3, essa simplificação é bastante aceitável.

A pressão interna também provoca tensão longitudinal ( $S_L$ ), ou seja, a que produziria a ruptura do tubo através de uma circunferência. Sua determinação é feita igualando-se a força atuante com a força resistente, partindo-se do princípio que o sistema de tubulação não é aberto para a atmosfera, chegando-se a expressão (II.9).

$$S_L = p_i \cdot r / (2 \cdot t) \quad (II.9)$$

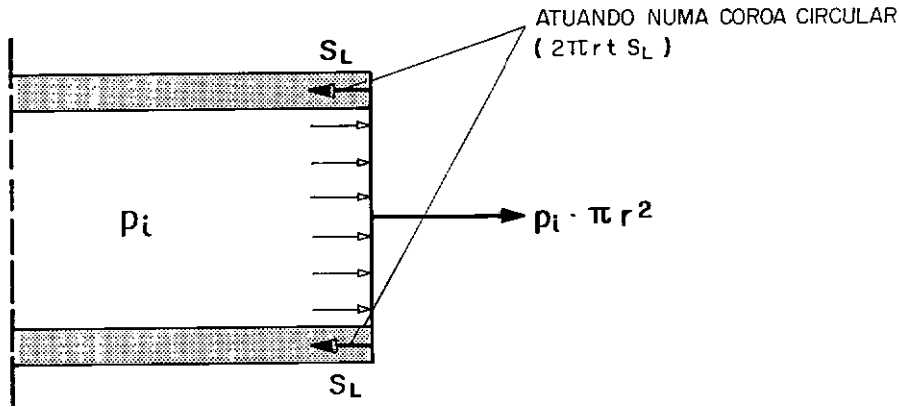


Figura (II.5) - Figura para determinar  $S_L$

#### 2.4- PESO PRÓPRIO E SOBRECARGAS

Um tubo sujeito ao peso próprio e sobrecargas devido a válvulas, flanges, etc, funciona como uma viga contínua com diversos apoios. Estes carregamentos produzem tensões longitudinais que, somadas às tensões longitudinais devidas a outros carregamentos tais como pressão interna, rigidez das juntas de expansão, atrito nos suportes, etc, devem ser inferiores às tensões admissíveis às tensões primárias ( $S_{ADM}$ ).

É prática de projeto usar-se, para cálculo da tensão longitudinal máxima, a expressão intermediária (II.10) entre a da viga bi-apoiada (II.11) e a da viga bi-engastada (II.12), visto que nos casos normais a tubulação se enquadra entre essas duas situações.

$$S_L = q.L^2/(10.Z) \quad (II.10)$$

$$S_L = q.L^2/(8.Z) \quad (II.11) \text{ (no centro)}$$

$$S_L = q.L^2/(12.Z) \quad (II.12) \text{ (nos engastes)}$$

Nestas equações, tem-se:

- q - carga distribuída, soma das seguintes parcelas:
- peso próprio do tubo
  - peso do fluido contido ou da água (o mais pesado)
  - peso do isolamento térmico
  - peso de outros tubos paralelos de pequeno diâmetro suportados
- Z - módulo de resistência

No caso de tubos com sobrecargas, usa-se também uma expressão intermediária entre os dois casos (II.13).

$$S_L = L(q.L + 2.Q)/(10.Z) \quad (II.13)$$

onde

Q - peso somado de válvulas e outros acessórios de tubulação, ou de derivações não suportadas, no centro do vão.

Para tubos de  $D_n$  maior que 20" para gases, pode ser desconsiderado o peso da água contida, quando não houver teste hidrostático, ou quando forem previstos suportes adicionais para este teste, e para tubos de  $D_n$  maior que 48" e paredes finas ( $D_o/t$  maior que 100), deve ser verificado o possível e feito do colapso na região em contacto com os suportes.

## 2.5- PROCEDIMENTO PARA DETERMINAÇÃO DA ESPESSURA COMERCIAL

A tensão circunferencial  $S_C$  é devida basicamente

à pressão interna, A tensão resultante do achatamento local do tubo em consequência dos diversos momentos fletores atuantes , que também provoca  $S_C$ , é localizada, e em materiais dúteis causa deformações localizadas que redistribuem as tensões. Essa tensão não é levada em conta, pela Norma ANSI B 31.3 para dimensionamento de tubos de materiais dúteis.

A tensão longitudinal  $S_L$  é provocada pela pressão interna, momentos fletores devido a peso próprio e sobrecargas, forças de atrito e todos os esforços axiais. Os esforços provenientes de dilatação térmica também provocam tensões longitudinais, mas serão estudados separadamente, conforme já foi explicado.

Já foi visto o valor da tensão longitudinal devido a peso próprio e sobrecargas. Entretanto vãos entre suportes muito grandes não são permitidos, pois acarretam valores excessivos de flechas no centro do vão, mesmo que as tensões longitudinais sejam satisfatórias. Logo, para fixação do vão entre suportes L, existe uma outra limitação (deflexão), que normalmente faz com que a tensão longitudinal devido a peso próprio e sobrecargas fique pequena. A fórmula utilizada para a obtenção de L (limitada pela flecha) também é uma intermediária entre os casos da viga bi-engastada e bi-apoiada (II.14).

$$\delta = \frac{24000 \cdot L^3}{E \cdot I} (Q/3 + q \cdot L/4) \quad (II.14)$$

onde

$\delta$  - flecha máxima

E - módulo de elasticidade do material a quente

I - momento de inércia da seção transversal do tubo



Como exemplo, a Norma Petrobrás N 1673 fixa em 6 mm o valor da flecha máxima no centro do vão, de um tubo situado em unidades de processo.

Baseado no exposto, foi elaborado o seguinte procedimento para determinação da espessura comercial do tubo: dimensiona-se pela tensão circunferencial e verifica-se a tensão longitudinal. Para determinação da espessura a Norma ANSI B 31.3 fornece as fórmulas (II.15) a (II.18), podendo-se utilizar qualquer uma delas.

$$t = \frac{p_i \cdot D_o}{2 \cdot S_{ADM}} \quad (II.15)$$

$$t = \frac{p_i \cdot D_o}{2(S_{ADM} + p_i \cdot Y)} \quad (II.16)$$

$$t = \frac{D_o}{2} \left( 1 - \sqrt{\frac{S_{ADM} - p_i}{S_{ADM} + p_i}} \right) \quad (II.17)$$

$$t = \frac{p_i \cdot D_i}{2 [S_{ADM} - p_i (1 - Y)]} \quad (II.18)$$

onde

Y - fator empírico que varia com o material e a temperatura, conforme a tabela (II.1), transcrita da Norma ANSI B 31.3.

Com  $D_o/t$  menores que 6 ou  $p_i$  maiores que 0,385  $S_{ADM}$  considerações especiais devem ser feitas, o que não é objetivo do nosso estudo. Pelas fórmulas (II.15) a (II.18) determinamos o valor de t (espessura requerida pela pressão interna). A esse valor devemos somar a sobreespessura de corrosão c(II.19)

$$t_m = t + c \quad (II.19)$$

Material/Temperatura(°C)	Valores do coeficiente Y				
	< 485	510	540	560	> 620
Aços Ferríticos	0,4	0,5	0,7	0,7	0,7
Aços Austeníticos	0,4	0,4	0,4	0,5	0,7
Outros materiais dúteis	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Ferro Fundido	0,0	-	-	-	-

Tabela (II.1)

Como na fabricação dos tubos existe a tolerância de fabricação, devemos também levá-la em conta para a determinação da espessura nominal, como mostra a expressão (II.20).

$$t_n = (t + c)/(1 - TF) \quad (II.20)$$

onde

TF - tolerância de fabricação (%)

Para tubos de aço carbono e aço liga, a Norma da Petrobrás N 1673 estabelece que não se deve adotar  $t_n$  inferior-

res aos da tabela (II.2).

$D_n$	$t_n$ (mínima)
1/2" a 1 1/2"	sch 80
2" a 6"	sch 40
8" a 36"	0,250"
42" a 48"	0,344"

Tabela (II.2)

Como a tubulação foi dimensionada pela tensão circunferencial  $S_C$ , ou seja,  $S_C = S_{ADM}$ , somente devido à pressão interna, a tensão longitudinal é  $S_C/2$ . Logicamente, para todos os outros esforços que provocam tensões primárias longitudinais sobra  $S_{ADM}/2$ .

Faz-se o cálculo do vão entre suportes  $L$ , considerando apenas os pesos próprios (tubo + fluido + isolamento), usando tensões admissíveis baixas ou limitando as deflexões.

A Norma Petrobrás N 1673 recomenda que a tensão a ser considerada no cálculo do vão entre suportes seja tomada como sendo  $S_{ADM}/4$ . Para os outros esforços (exceto  $p_i$  e pesos próprios) sobra  $S_{ADM}/4$ .

Configurações não retilíneas também devem ser calculadas para que a tensão longitudinal máxima devida aos pesos próprios não exceda  $S_{ADM}/4$ .

### III - ANÁLISE DAS TENSÕES SECUNDÁRIAS

#### 3.1 - INTRODUÇÃO

Tensões secundárias são tensões provenientes de dilatação térmica e de movimentos provocados por agentes externos ao sistema. É bastante justificável a preocupação com as tensões secundárias, pois um trecho reto de tubo entre duas ancoragens (figura III.1), para um pequeno aumento de temperatura, já leva nos aços carbono a tensões bastante elevadas. Para controlar os efeitos das dilatações térmicas, existem as três soluções mostradas a seguir.

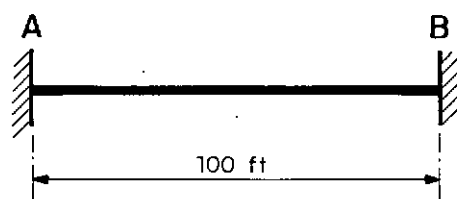


Figura (III.1) - Tubo ancorado

##### 3.1.1 - PRÉ-TENSIONAMENTO

Consiste em montarmos a tubulação com uma tensão de sinal contrário a que irá ocorrer quando o sistema estiver trabalhando à quente. Na figura (III.1) iríamos cortar um segmento da tubulação e fazer a montagem do sistema tracionado. Chega-se ao diagrama ( $\sigma_{xt}$ ) mostrado na figura (III.2).

Neste caso a tensão máxima fica menor, mas o  $\Delta\sigma$  permanece o mesmo. Considerando-se o fenômeno do relaxamento espontâneo de tensões, verificamos que o pré-tensionamento só

é útil para redução dos esforços nas ancoragens, não acarretando benefícios para o cálculo de flexibilidade ( $\Delta\sigma$  é o que importa).

A Norma ANSI B 31.3 exige que o cálculo de flexibilidade seja feito sem levar em conta o pré-tensionamento. Se este for realizado, somente para calcular-se as reações nos extremos é que podemos levá-lo em consideração.

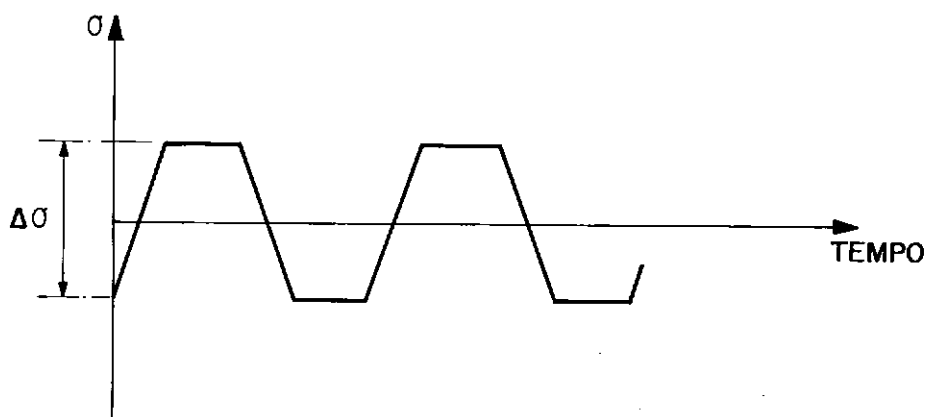


Figura (III.2) - Gráfico  $\sigma \times t$

### 3.1.2 - JUNTAS DE EXPANSÃO

Consiste em se intercalar na tubulação um elemento flexível (figura III.3) capaz de absorver os deslocamentos provocados pelas dilatações térmicas.

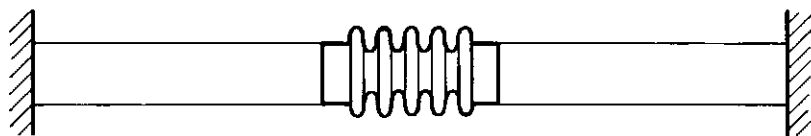


Figura (III.3) - Junta de expansão

### 3.1.3 - FLEXIBILIDADE PRÓPRIA

A Norma Petrobrás N 1673 recomenda que a flexibilidade das tubulações deve ser conseguida por um traçado não retilíneo adequado, devendo-se evitar o emprego de juntas de

expansão, bem como o pré-tensionamento. O uso de qualquer desses recursos só é permitido quando não houver outra solução técnica ou quando apresentar substancial economia, devendo, em cada caso, o projetista justificar o seu emprego junto à Petrobrás. Pelo exposto, vemos que a solução mais empregada é a da flexibilidade própria, e será o tema do nosso estudo.

Diz-se que um sistema de tubulação é flexível, quando ele é capaz de deformar-se para acomodar as dilatações térmicas, de tal maneira que as tensões e esforços reinantes no sistema sejam menores que valores máximos admissíveis.

Os esforços nos extremos do sistema também devem ser menores que valores admissíveis para que a configuração seja considerada flexível. O cálculo de flexibilidade é um cálculo de verificação, ou seja, a partir de uma configuração proposta, vamos fazer o estudo para verificar se ela é ou não flexível.

### 3.2- INFLUÊNCIAS GEOMÉTRICAS

Em sistemas planos as dilatações impõem às barras deformações sob a forma de flexões. Em sistemas tri-dimensionais há flexões e torções.

Uma tubulação tri-dimensional é em geral mais flexível que uma plana com o mesmo comprimento total desenvolvido, porque o efeito de torção é bastante eficiente, tornando a tensão efetiva máxima atuante no sistema um pouco menor.

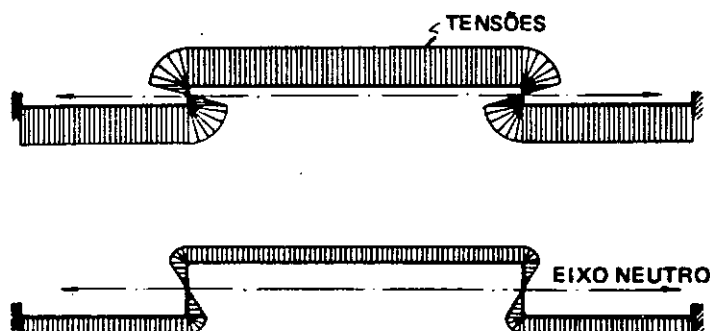
Quanto à influência do diâmetro e da espessura, observamos que na resolução dos sistemas (I.13), obteremos valores de momentos proporcionais ao produto  $EI$ . Como o módulo

de resistência é proporcional a  $I$  e inversamente proporcional a  $D$ , chegamos a conclusão que a tensão é proporcional ao produto  $ED$ , ou seja, quanto maior o diâmetro, maior será a tensão que a tubulação estará sujeita, para absorver um mesmo deslocamento, isto é, fixadas as demais condições, quanto menor for o diâmetro mais flexível é o sistema.

Conclusão importante que tiramos também é que a espessura do tubo não influencia no cálculo de flexibilidade, ou seja, se um sistema não for flexível não adianta aumentar a espessura do tubo. Entretanto, a influência da espessura se faz nos fatores de intensificação de tensões e no fator de flexibilidade, que serão definidos mais adiante. Dependendo do local da tensão máxima, o aumento da espessura pode melhorar ou piorar a flexibilidade, mas essa modificação é não significativa nos casos práticos.

No que se refere à influência do traçado, pode-se dizer:

- Comprimento desenvolvido - quanto maior for o comprimento desenvolvido em relação à distância entre ancoragens, mais flexível será o sistema. Como exemplo retiramos do livro de TELLES (4) a figura (III.4).



S	R	L/U
10	229	1,05
3	20	1,15

Figura (III.4) - Influência do comprimento total

- Proporcionalidade - quanto maiores forem as desproporções entre os diversos trechos, menos flexível será o sistema. Como exemplo retiramos do livro de TELLES (4) a figura (III.5).

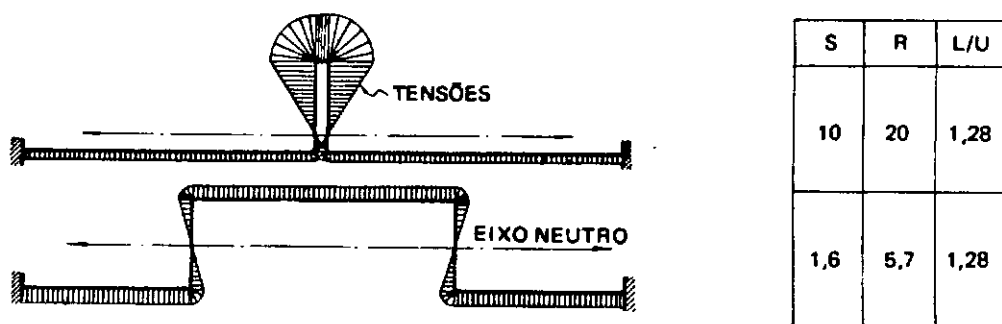


Figura (III.5) - Influência da proporcionalidade

- Liberdade de deformação - quanto mais liberdade a tubulação tiver de se deformar, tanto mais flexível será o sistema. Como exemplo retiramos do livro de TELLES (4) a figura (III.6).

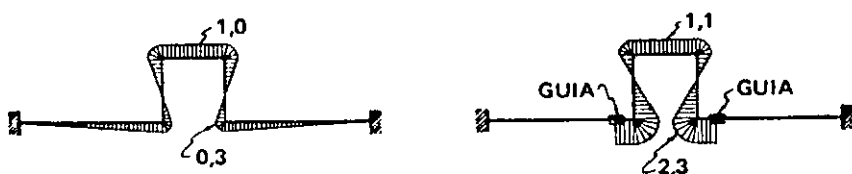


Figura (III.6) - Influência das restrições

- Simetria do traçado - quanto mais simétrico for o traçado do sistema, melhor será a flexibilidade. Como exemplo retiramos do livro de TELLES (4) a figura (III.7).



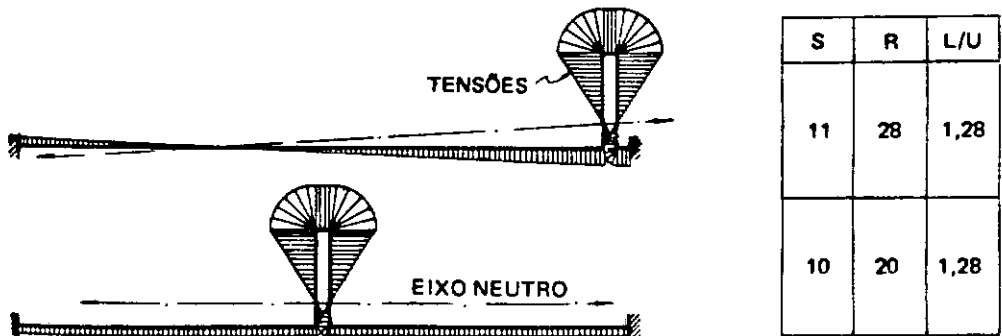


Figura (III.7) - Simetria de traçado

Nas figuras (III.4) a (III.7) temos:

- S - tensão máxima no sistema
- R - reação máxima nas ancoragens
- L - comprimento total desenvolvido
- U - distância entre ancoragens

### 3.3 - CONDIÇÕES DE PROJETO

#### 3.3.1- SITUAÇÕES EM QUE O CÁLCULO É DISPENSÁVEL

O cálculo de flexibilidade deve incluir a determinação dos esforços exercidos pelo sistema sobre os pontos de fixação, bem como sobre as restrições (guias, batentes), para todo sistema de tubulação. Nos seguintes casos especiais, o cálculo é dispensável, segundo a Norma ANSI B 31.3.

- 1- Sistema igual a um existente que opere há longo tempo.
- 2- Sistema igual a um existente com mesmo diâmetro e menor temperatura, ou igual temperatura e menor diâmetro.
- 3- Tubulações enterradas.
- 4- Sistema frio, não exposto ao sol nem a lavagem com vapor (steam-out).
- 5- Sistemas de diâmetro uniforme, com dois pontos de fixação, sem restrições intermediárias (suportes, guias, etc) que satisfaçam as equações (III.1).

$$\frac{D \cdot Y}{(L-U)^2} < 0,03 \quad \text{(III.1.A)}$$

onde

D - diâmetro externo (in)

Y - dilatação resultante total (in)

L - comprimento total desenvolvido (ft)

U - distância entre ancoragens (ft)

$$\frac{D \cdot Y}{(L-U)^2} < 208,3 \quad (\text{III.1.B})$$

onde

D - diâmetro externo (mm)

Y - dilatação resultante total (mm)

L - comprimento total desenvolvido (m)

U - distância entre ancoragens (m)

### 3.3.2- TEMPERATURA DE PROJETO

Para o cálculo de flexibilidade deve ser considerada, em cada caso, a mais alta das seguintes temperaturas, independente do valor simultâneo que possa ter a pressão na tubulação:

- 1- Temperatura máxima de operação da tubulação, em regime normal ou em qualquer outra condição anormal ou eventual que possa ocorrer.
- 2- Temperatura do vapor para todas as tubulações sujeitas a aquecimento e lavagem com vapor, dependendo do nível de pressão utilizado.
- 3- 60 °C para todas as tubulações expostas ao sol.

### 3.3.3- DESLOCAMENTOS DOS PONTOS EXTREMOS

Devem, obrigatoriamente, ser considerados para o cálculo de flexibilidade o efeito dos movimentos dos pontos extremos, considerando-se as diversas alternativas relativas desses movimentos. Observando a figura (III.8), vemos que quando  $\Delta Y$  ocorre sempre, mesmo que o seu efeito seja de melhorar

a flexibilidade, devemos considerá-lo no cálculo; entretanto , se  $\Delta Y$  pode ou não ocorrer, só podemos considerá-lo quando ele tende a piorar a flexibilidade do sistema. Caso haja dúvida sobre o efeito que  $\Delta Y$  cause ao sistema neste segundo caso, devem ser feitos os dois cálculos.

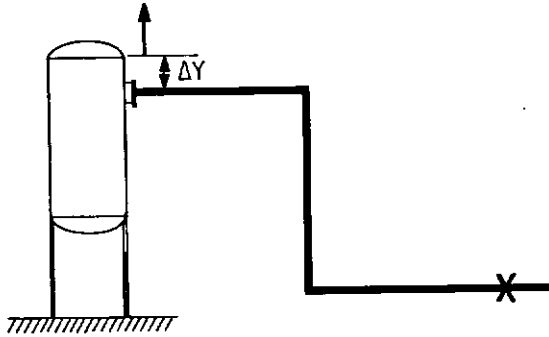


Figura (III.8) - Deslocamento imposto ao sistema

#### 3.3.4- RESTRIÇÕES À LIVRE DILATAÇÃO DO SISTEMA

Todas as restrições devem ser consideradas. Atenção especial merecem os suportes. Estes só devem ser considerados quando impedirem as dilatações. Se, por exemplo, em um sistema de tubulação plano estiver no plano horizontal (figura III.9), nenhum suporte deve ser considerado, pois as dilatações não serão impedidas pelos mesmos. Para um sistema espacial, os suportes podem ou não afetar os deslocamentos provenientes das dilatações térmicas, e somente deverão ser considerados quando impedirem tais deslocamentos.



Figura (III.9) - Restrições à dilatação

### 3.3.5 - MÓDULO DE ELASTICIDADE

A Norma ANSI B 31.3 exige que, para cálculo das tensões provenientes das dilatações térmicas, seja considerado o módulo de elasticidade na temperatura ambiente ( $20^{\circ}\text{C}$ ). Este procedimento nos levará a tensões calculadas maiores do que as tensões que efetivamente estão ocorrendo.

No que concerne ao cálculo dos esforços nas ancoragens e demais restrições, a citada Norma admite que se faça a correção dos valores encontrados, levando-se em conta o módulo de elasticidade na temperatura de projeto. Os esforços nas restrições, obtidos no cálculo de flexibilidade, devem-se somente ao efeito das tensões secundárias. Para se dimensionar uma ancoragem (ou para saber o esforço real num bocal que atue como ponto de fixação), devemos somar os possíveis esforços devidos às cargas que provocam tensões primárias.

## 3.4 - TENSÕES SECUNDÁRIAS E REAÇÕES

### 3.4.1 - TENSÃO EFETIVA

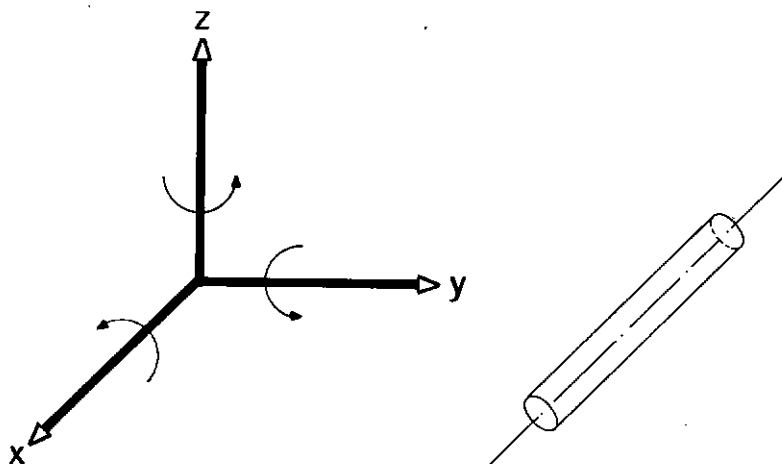


Figura (III.10) - Tubo e eixos coordenados

Uma seção de um tubo poderá ter três deslocamentos lineares e três angulares. A partir do instante em que de alguma forma esses deslocamentos são impedidos, irão aparecer forças e momentos que darão origem a um estado de tensões no tubo. As tensões de flexibilidade, como será visto adiante, são calculadas desprezando-se os esforços diretos (tração, compressão e cisalhamento). No exemplo da figura (III.10) teremos:

- $M_x$  - momento torsor
- $M_y$  e  $M_z$  - momentos fletores
- $F_x$  - tração ou compressão
- $F_y$  e  $F_z$  - forças cisalhantes

Conforme já foi visto, usa-se o critério do cisalhamento máximo (Guest-Tresca) para a determinação da tensão efetiva ( $S_E$ ), chegando-se a equação (III.2).

$$S_E = \sqrt{4 \cdot S_t^2 + S_b^2} \quad (\text{III.2})$$

onde

$S_t$  - tensão resultante do momento torsor

$$S_t = M_t / (2 \cdot Z) \quad (\text{III.3})$$

$S_b$  - tensão resultante dos momentos fletores

$$S_b = \sqrt{M_i^2 + M_o^2} / Z \quad (\text{III.4})$$

Para curvas e derivações (para a linha tronco) o valor de  $S_b$  será dado pela equação (III.5)

$$S_b = \frac{\sqrt{(i_i \cdot M_i)^2 + (i_o \cdot M_o)^2}}{Z} \quad (\text{III.5})$$

onde

$M_i$  - momento fletor no plano do acessório

$M_o$  - momento fletor fora do plano do acessório

$i_i$  - fator de concentração de tensões no plano do acessório

$i_o$  - fator de concentração de tensões fora do plano do acessório

Para o ramal (em uma derivação), teremos a expressão (III.6)

$$S_b = \frac{\sqrt{(i_i \cdot M_i)^2 + (i_o \cdot M_o)^2}}{Z_e} \quad (\text{III.6})$$

onde

$Z_e$  - momento resistente efetivo do ramal

O valor de  $Z_e$  é obtido aplicando-se a equação (III.7).

$$Z_e = \pi \cdot r_m^2 \cdot t_s \quad (\text{III.7})$$

onde

$r_m$  - raio médio da seção transversal

$t_s$  - espessura efetiva do ramal - o menor entre  $t_h$  e  $i_o \cdot t_b$

$t_h$  - espessura do tubo tronco (excluído qualquer reforço)

$t_b$  - espessura do ramal

### 3.4.2 - FATORES DE CONCENTRAÇÃO DE TENSÕES

Os fatores de concentração de tensões ( $i_i$  e  $i_o$ ) são números sempre maiores que a unidade, que expressam a concentração de tensões que se verifica em consequência das descontinuidades geométricas de acessórios.

Esses fatores poderão ser obtidos através de valores retirados da tabela (III.1), transcrita da ANSI B 31.3.

### 3.4.3 - FATOR DE FLEXIBILIDADE

O fator de flexibilidade ( $k$ ) é um número sempre maior que a unidade e que expressa a relação entre a flexibilidade real de um elemento curvo e a flexibilidade desse mesmo elemento calculado pela teoria.

Mantidas as demais características, quanto maior o valor de  $k$  mais flexível é o elemento curvo. O fator  $k$  atua como um divisor do momento de inércia, ou do módulo de elasticidade apenas na parte referente aos momentos fletores. O fator de flexibilidade para torção é considerado aproximadamente igual a unidade. Os cálculos dos valores de  $k$  podem ser feitos pela tabela (III.1).

### 3.4.4 - TENSÃO ADMISSÍVEL ÀS TENSÕES SECUNDÁRIAS

Conforme já foi comentado, o valor da tensão admissível para cálculo de flexibilidade não é o mesmo adotado para as tensões primárias. Esse valor é dado pela expressão seguinte (III.8).

$$S_A = f(1,25 S_C + 0,25 S_h) \quad (III.8)$$



onde

$S_A$  - tensão admissível às tensões secundárias

$S_c$  - tensão admissível básica na temperatura ambiente

$S_h$  - tensão admissível básica na temperatura de projeto

$f$  - fator que leva em conta o número de ciclos

Os valores de  $S_c$  e  $S_h$  são retirados da tabela de tensões admissíveis básicas e o valor de  $f$  (normalmente igual a unidade) pode ser retirado da tabela (III.2), retirada da Norma ANSI B 31.3.

nº de ciclos (n)		f
n 7000		1
7000	n 14000	0,9
14000	n 22000	0,8
22000	n 45000	0,7
45000	n 100000	0,6
n 100000		0,5

Tabela III.2

Se o tubo for com costura, a Norma ANSI B 31.3 admite que os valores de  $S_c$  e  $S_h$  sejam tomados como se o tubo fosse sem costura. A mesma Norma admite que, se tivermos o somatório dos esforços longitudinais devido às tensões primárias ( $\Sigma S_L$ ) menor que  $S_h$ , a tensão  $S_A$  seja calculada pela expres

são (III.9).

$$S_A = f \left[ 1,25(S_C + S_h) - \sum S_L \right] \quad (\text{III.9})$$

#### 3.4.5 - CÁLCULO DAS REAÇÕES NOS EXTREMOS

Para o cálculo das reações nos dispositivos de fixação, é admitida uma correção em relação aos esforços obtidos no cálculo de flexibilidade, já que neste caso se pode considerar o módulo de elasticidade na temperatura de projeto.

Caso os pontos de fixação sejam ancoragens propriamente ditas (tubo soldado no suporte, por exemplo), não precisaremos nos preocupar com os esforços, e apenas considerá-los quando do dimensionamento da ancoragem. Entretanto, caso a ancoragem seja o bocal de um equipamento, devemos calcular esses esforços e comparar com os valores admissíveis.

#### 3.4.6 - PROCESSOS DE CÁLCULO

Os métodos de cálculo de flexibilidade podem ser divididos em três grandes grupos, em ordem crescente de precisão: métodos de cálculo simplificados, métodos gráficos simplificados e os métodos exatos. Esse último grupo só é exequível com eficiência utilizando-se programas de computador.

No capítulo seguinte, está descrito um programa de computador para cálculo das tensões secundárias. Quanto aos dois primeiros grupos, tratam-se de métodos menos precisos e não são o objetivo do nosso estudo.

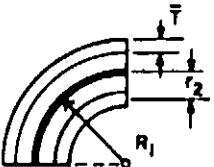
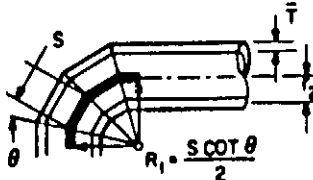
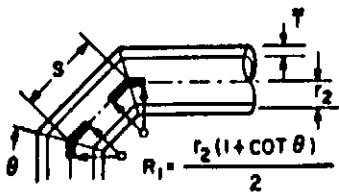
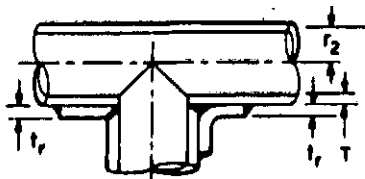
Descrição	k	$i_o$	$i_i$	h	Figura
Curva soldada ou tubo curvado (curva normal)	$\frac{1,65}{h}$	$\frac{0,75}{h^{2/3}}$	$\frac{0,9}{h^{2/3}}$	$\frac{\bar{T} \cdot R_1}{(r_2)^2}$	
Curva em gomos pouco espaçada $s < r_2(1+\tan\theta)$	$\frac{1,52}{h^{5/6}}$	$\frac{0,9}{h^{2/3}}$	$\frac{0,9}{h^{2/3}}$	$\frac{\cot\theta}{2} \frac{\bar{T} \cdot s}{(r_2)^2}$	
Curva em gomos muito espaçada $s > r_2(1+\tan\theta)$	$\frac{1,52}{h^{5/6}}$	$\frac{0,9}{h^{2/3}}$	$\frac{0,9}{h^{2/3}}$	$\frac{1+\cot\theta}{2} \frac{\bar{T}}{r_2}$	
Tê reforçado com chapa ou sela	1	$\frac{0,9}{h^{2/3}}$	$\frac{3}{4} i_o + \frac{1}{4}$	$\frac{(\bar{T} + 0,5 t_r)^{5/2}}{\bar{T}^{3/2} \cdot r_2}$	

Tabela (III.1B) - fatores i e k

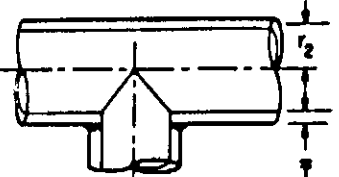
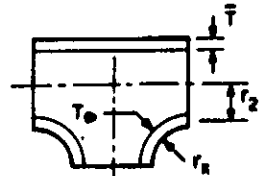
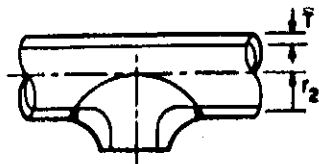
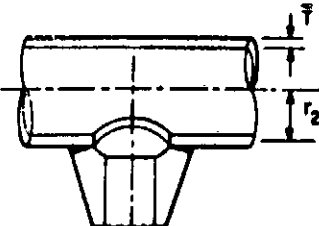
Descrição	k	$i_o$	$i_i$	h	Figura
Tê normal ( fabricado sem reforço)	1	$\frac{0,9}{h^{2/3}}$	$\frac{3}{4} i_o + \frac{1}{4}$	$\frac{\bar{T}}{r_2}$	
Tê estrudado soldado $T_c < 1,5 \bar{T}$	1	$\frac{0,9}{h^{2/3}}$	$\frac{3}{4} i_o + \frac{1}{4}$	$(1+r_x/r_2) \frac{\bar{T}}{r_2}$	
Sela soldada $r_x = 1/8 D_b$ $T_c = 1,5 \bar{T}$	1	$\frac{0,9}{h^{2/3}}$	$\frac{3}{4} i_o + \frac{1}{4}$	$4,4 \frac{\bar{T}}{r_2}$	
Derivação com colar	1	$\frac{0,9}{h^{2/3}}$	$\frac{0,9}{h^{2/3}}$	$3,3 \frac{\bar{T}}{r_2}$	

Tabela (III.1A) - Fatores i e k

#### IV - PROGRAMA PARA CÁLCULO DAS TENSÕES SECUNDÁRIAS

##### 4.1 - DESCRIÇÃO DO PROGRAMA

###### 4.1.1 - INTRODUÇÃO

O Programa foi elaborado com a finalidade de resolver a grande maioria dos problemas de cálculo de tensões secundárias em sistemas de tubulação encontrados na prática. Os carregamentos que estão agindo no nosso sistema são os deslocamentos prescritos e os esforços provenientes de dilatação térmica. Apesar de só estar preparado para rodar um caso de carregamento de cada vez, o vetor de cargas  $F$  está dimensionado de tal forma que facilmente poderão ser feitas mudanças no Programa para rodar vários casos de carregamento de cada vez.

Os sistemas de tubulação são analisados sob o comportamento linear e para tal é usado o método dos deslocamentos. O Programa foi elaborado na linguagem BASIC para o micro-computador SCOPUS  $\mu C$  200. A matriz de rigidez global é armazenada em um vetor de trabalho 'A' pelo método de altura efetiva de coluna, com auxílio de um vetor apontador que indica a posição no vetor 'A' de um elemento da diagonal principal. Pelo fato de escassez de memória, o Programa foi dividido em quatro, e os dados necessários à continuidade de execução do Programa foram gravados em disco.

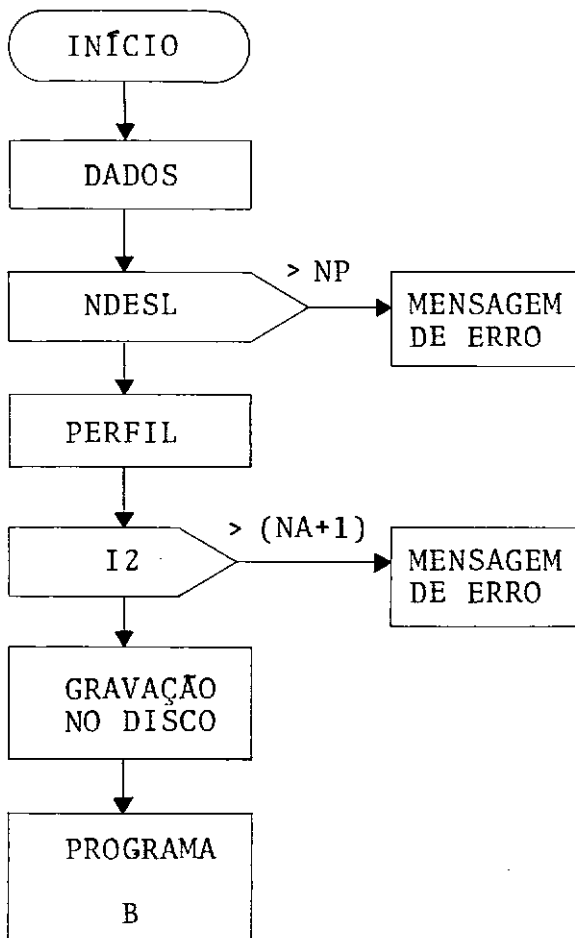
Aliado à técnica de armazenamento por altura efetiva de coluna, utilizou-se o método de Cholesky para a resolução do sistema de equações, onde o vetor dos deslocamentos ocupou a mesma posição de memória do vetor de carregamentos.

Uma vez obtidos os deslocamentos, os esforços finais nas extremidades de cada elemento foram calculados com o auxílio das matrizes de rigidez de cada elemento já pós multiplicada pelas matrizes de rotação "pertinentes", gravadas em disco por ocasião do cálculo e montagem da matriz de rigidez da estrutura.

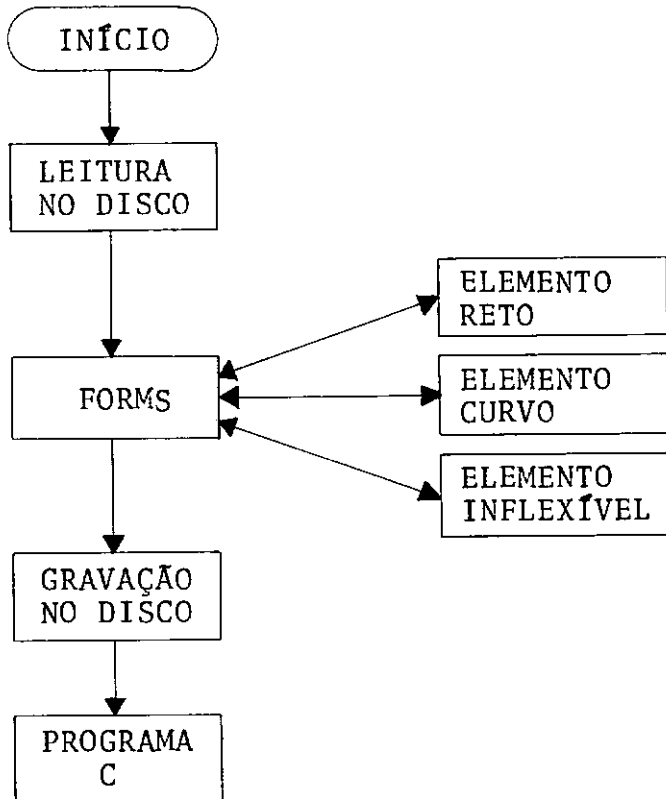
Tendo sido obtidos os esforços finais, as reações de apoio são calculados pelo somatório das contribuições de todos os elementos que incidam no ponto nodal do apoio no sistema global.

#### 4.1.2 - FLUXOGRAMAS

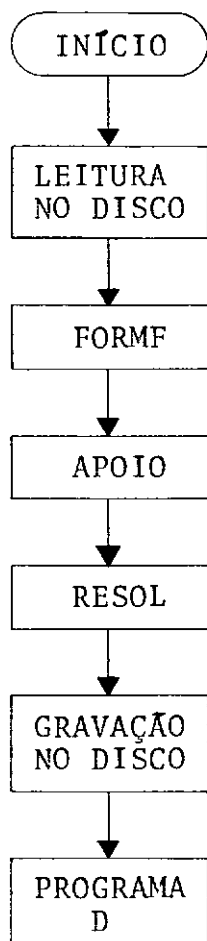
##### 4.1.2.1 - PROGRAMA A



## 4.1.2.2 - PROGRAMA B

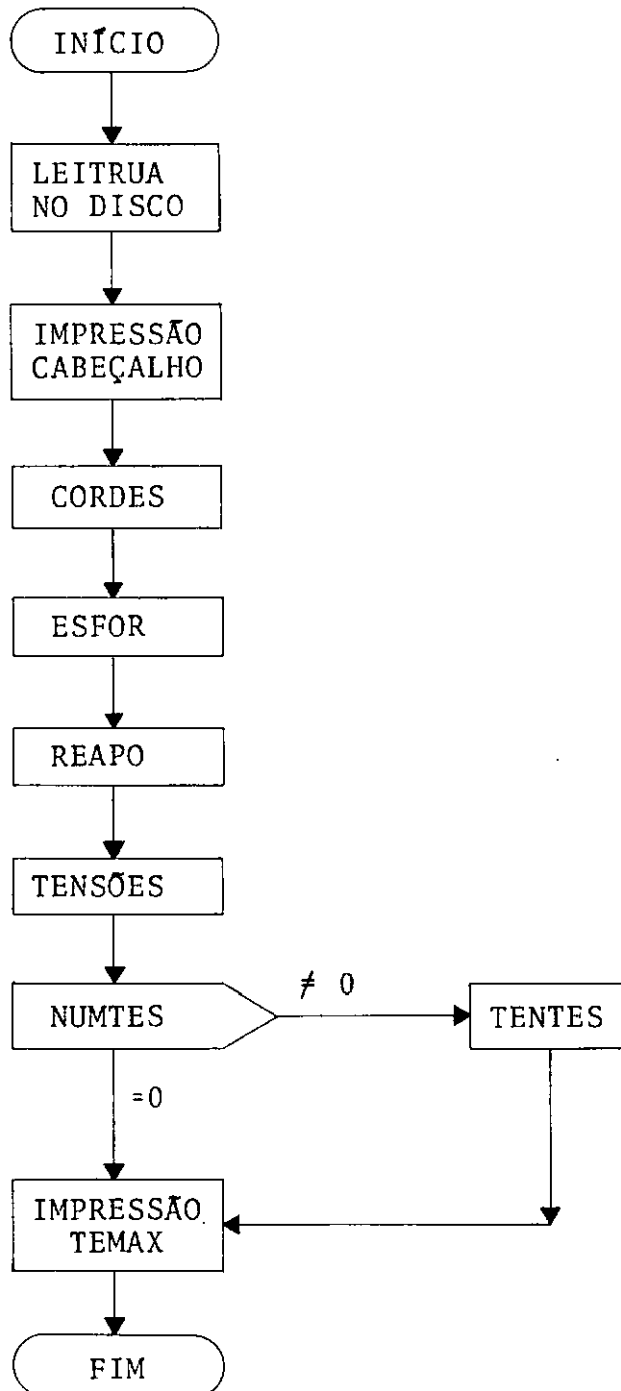


## 4.1.2.3 - PROGRAMA C





## 4.1.2.4 - PROGRAMA D



### 4.1.3 - DESCRIÇÃO DO PROGRAMA

O Programa A apenas inicializa algumas variáveis, verifica se a dimensão do vetor "A" é suficiente, calcula poucas variáveis, faz a chamada das subrotinas DADOS e PERFIL e grava no disco os dados necessários aos outros programas. Os demais, lêem os dados gravados no disco, fazem as chamadas das subrotinas e ao final gravam os valores por ele calculados. Toda a impressão de resultados e dados iniciais é feita no último programa (Programa D).

### 4.1.4 - DESCRIÇÃO DAS SUBROTINAS

#### 4.1.4.1 - SUBROTINA DADOS

Subrotina para ler dados gerais da estrutura, tais como coordenadas dos nós, matriz de incidência, características geométricas e elásticas. Em suma, são dados constantes de cada problema.

#### 4.1.4.2 - SUBROTINA PERFIL

Pesquisa a altura efetiva de cada coluna e monta o vetor apontador, que indica a posição no vetor de trabalho A de um elemento da diagonal principal da matriz de rigidez da estrutura.

#### 4.1.4.3 - SUBROTINA FORMS

Esta subrotina calcula o comprimento de elementos retos e monta a matriz de rotação de todos os elementos. Ela transforma a matriz de rigidez do elemento do sistema local para o global e distribui, somando convenientemente no vetor de trabalho A. Na operação de transformação da matriz, uma parcela intermediária e de interesse é gravada no disco (SMR).

Tanto a matriz de rigidez para elemento curvo, como para elemento reto, foram retiradas da brilhante tese de mestrado de autoria do engenheiro Ezio da Rocha Araújo (10). Quanto ao elemento inflexível, foi considerado um tubo com diâmetro externo igual ao diâmetro normal acrescido de seis vezes a espessura, e espessura seis vezes maior do que a espessura normal, ou seja, um elemento bastante rígido.

No caso do tubo não ser paralelo a nenhuma direção global, a matriz de rotação é determinada com o eixo y local figurando numa posição qualquer, visto que como estamos estudando tubos, não é necessário fixarmos o eixo y.

#### 4.1.4.4 - SUBROTINA FORMF

Forma o vetor de cargas F, que no caso só contém deslocamentos prescritos, somando à variável REC os deslocamentos lineares impedidos pelos apoios (com o sinal contrário), a fim de simular o efeito da dilatação térmica impedida.

#### 4.1.4.5 - SUBROTINA APOIO

Esta subrotina decodifica um código fornecido para cada apoio na subrotina DADOS, onde "1" indica direção restringida e "0" direção livre. Quando houver deslocamento prescrito este é fornecido na variável REC. Só podemos ter deslocamento prescrito se estamos numa direção restringida (código 1).

Ela também é responsável por tornar a matriz de rigidez não singular e possibilitar a resolução do sistema de equações. É utilizada a técnica do número muito grande.

#### 4.1.4.6 - SUBROTINA RESOL

Resolve o sistema de equações pelo método de Cholesky. Os resultados obtidos (deslocamentos) ficam armazenados

na mesma posição de memória do vetor de cargas F.

#### 4.1.4.7 - SUBROTINA CORDES

Corrige os deslocamentos nos nós, visto que na realidade o efeito de dilatação térmica não introduz deslocamentos nos apoios, conforme foi simulado na subrotina FORMF.

#### 4.1.4.8 - SUBROTINA ESFOR

Esta subrotina tem por finalidade calcular os esforços finais nas extremidades dos elementos através do produto da matriz de rigidez do elemento no sistema local pelo vetor dos deslocamentos também no sistema local. Porém, como os deslocamentos obtidos na subrotina RESOL estão no sistema global, devemos pré multiplicá-los pela matriz de rotação, onde obtemos a expressão (IV.1).

$$AM = SM.R.F \quad (IV.1)$$

Como a primeira parcela do produto (SM.R) já foi gravada no disco por ocasião da montagem da matriz de rigidez, resta apenas pós multiplicá-la por F. Estes esforços são impressos nesta subrotina, assim como os deslocamentos.

#### 4.1.4.9 - SUBROTINA REAPO

Esta subrotina calcula e imprime as reações de apoio. Estes resultados são obtidos no sistema global, e para isto aplicamos a matriz de rotação à cada barra passando as ações de extremidade AM para o sistema global e somando-as conforme a incidência.

#### 4.1.4.10 - SUBROTINA TENSOES

Esta subrotina calcula a tensão de acordo com a Norma ANSI B 31.3 para elementos retos e curvos, e imprime a mensagem "ELEMENTO INFLEXÍVEL" caso o elemento o seja. Em ele-

mentos curvos, leva em conta os fatores de intensificação de tensões no plano da curva e fora do plano da curva. Como o sistema de eixos locais para a curva não é conveniente para a determinação do momento torsor  $M_t$  e do momento fletor fora do plano da curva  $M_o$ , é feita uma projeção dos vetores  $M_x$  e  $M_y$  do sistema local para a determinação de  $M_t$  e  $M_o$ , conforme mostra a figura (IV.1) e equações (IV.2). O momento fletor no plano da curva é sempre o momento  $M_z$ .

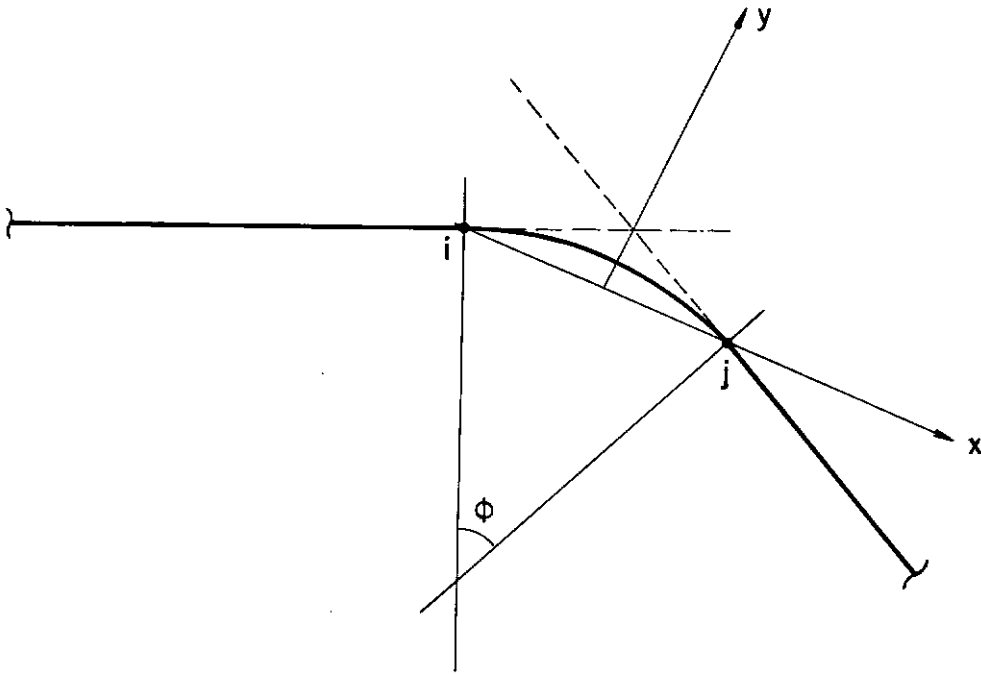


Figura (IV.1) -  $M_t$  e  $M_o$  em curvas

$$\begin{aligned}
 \text{Ponto i} \quad & \begin{cases} M_t = M_x \cos \phi / 2 + M_y \sin \phi / 2 \\ M_o = M_y \cos \phi / 2 - M_x \sin \phi / 2 \end{cases} \\
 \text{Ponto j} \quad & \begin{cases} M_t = M_x \cos \phi / 2 - M_y \sin \phi / 2 \\ M_o = M_y \cos \phi / 2 + M_x \sin \phi / 2 \end{cases}
 \end{aligned} \quad (IV.2)$$

#### 4.1.4.11 - SUBROTINA TENTES

Esta subrotina leva em conta o fator de intensificação de tensões no plano do tê e fora do plano do tê, calculando a tensão efetiva de acordo com a Norma ANSI B 31.3. Para isto é fornecido ao Programa o plano em que está localizado o tê. Combinando esta informação com a matriz de rotação dos elementos que convergem para o acessório, o Programa determina os momentos  $M_i$  e  $M_o$ . O momento torsor é sempre o momento  $M_x$  no sistema local. No caso do tê estar localizado num plano qualquer o Programa considera os dois fatores de intensificação de tensões iguais ao maior deles, e nesse caso é indiferente saber qual dos momentos está agindo no plano ou fora do plano do acessório.

#### 4.2 - DADOS DE ENTRADA

##### 4.2.1 - UNIDADES EMPREGADAS

- Coordenadas dos nós, diâmetro externo, espessura , deslocamentos prescritos (mm)
- Módulo de elasticidade e Tensões ( $\text{daN/mm}^2$ )
- Dilatação unitária ( $1/^\circ\text{C}$ )
- Temperatura ( $^\circ\text{C}$ )
- Rotações prescritas (rad)
- Ângulo das curvas (graus)
- Forças (daN)
- Todas as entradas de dados literais devem ser fornecidas em letras MAIÚSCULAS

#### 4.2.2 - PONTOS NODAIS

Todas as ancoragens, guias, batentes, suportes atuantes, além do início e fim de cada elemento são pontos nodais.

#### 4.2.3 - CURVAS EM GOMOS

Nesse caso o Programa pede como dados de entrada o fator de flexibilidade e os fatores de intensificação de tensões da curva. Esses fatores tem preferência sobre os calculados pelo Programa.

#### 4.2.4 - TÊS

O Programa calcula os fatores de intensificação de tensões para tês forjados fabricados de acordo com a Norma ANSI B 16.9. Para outros tipos, também é pedido pelo Programa os fatores de intensificação de tensões, que também tem preferência sobre os calculados pelo Programa.

#### 4.2.5 - CÓDIGO DE APOIO

É fornecido um código para cada nó com direção restringida na variável NTC com seis algarismos. O algarismo 1 indica que a direção está impedida de se deslocar e o algarismo 0 indica que a direção está livre.

Exemplo: o código 110101 significa que:

- 1 - direção X global com deslocamento impedido
- 1 - direção Y global com deslocamento impedido
- 0 - direção Z global com deslocamento livre
- 1 - eixo X global com rotação impedida
- 0 - eixo Y global com rotação livre
- 1 - eixo Z global com rotação impedida

#### 4.2.6 - COMO FORNECER OS DADOS DE ENTRADA

O Programa foi elaborado em BASIC, e há uma interação computador-usuário, o que facilita bastante a entrada dos dados. O sistema de referência global deve ser um triedro direto, e os tubos preferencialmente devem correr paralelos as direções do sistema global. Quanto ao tipo de elemento, ele pode ser reto (RET), curvo (CUR) ou inflexível (INF) no caso por exemplo de uma válvula.

#### 4.2.7 - CAPACIDADE DO PROGRAMA

- n° máximo de nós (30)
- n° máximo de elementos (30)
- n° máximo de nós com direções restringidas (10)
- n° máximo de tipos de seção (5)

Devido a pouca memória disponível (aproximadamente 27000 bytes), houve necessidade da divisão do Programa em quatro. Após cada Programa ser executado são gravados no disco as variáveis de interesse e chamado o Programa seguinte. Há também duas versões do Programa, uma com comentários para melhor compreensão e outra sem os mesmos para resolução de sistemas maiores. Apesar das limitações de memória, a grande maioria dos problemas de tensões secundárias pode ser resolvido por esse Programa.



## V - APLICAÇÕES

### 5.1 - PRIMEIRA APLICAÇÃO

Sistema de tubulação mostrado na figura (V.1) . As cotas estão dadas em milímetros e o tê é forjado, fabricado de acôrdo com a Norma ANSI B 16.9. As demais condições de projeto do sistema são dadas a seguir:

- Temperatura (121 °C)
- Material do tubo (ASTM A 106 Gr. A)
- Curvas de raio longo (  $R=1,5D_n$  )
- Coeficiente de dilatação linear ( $1,2376 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ )
- Tipos de seção reta:  $D_e = 273 \text{ mm}$  ;  $t_n = 9,27 \text{ mm}$       e  
 $D_e = 219 \text{ mm}$  ;  $t_n = 8,18 \text{ mm}$
- Número de ciclos de operação (  $< 7000$  )

Os nós estão numerados na figura (V.2) e os resultados mostrados a seguir. A tensão admissível é obtida aplicando-se a fórmula (III.8) ( $S_{ADM} = 17 \text{ daN/mm}^2$ ).

Como a máxima tensão do nosso sistema é maior que  $S_{ADM}$ , chegamos a conclusão que a nossa configuração não é flexível.

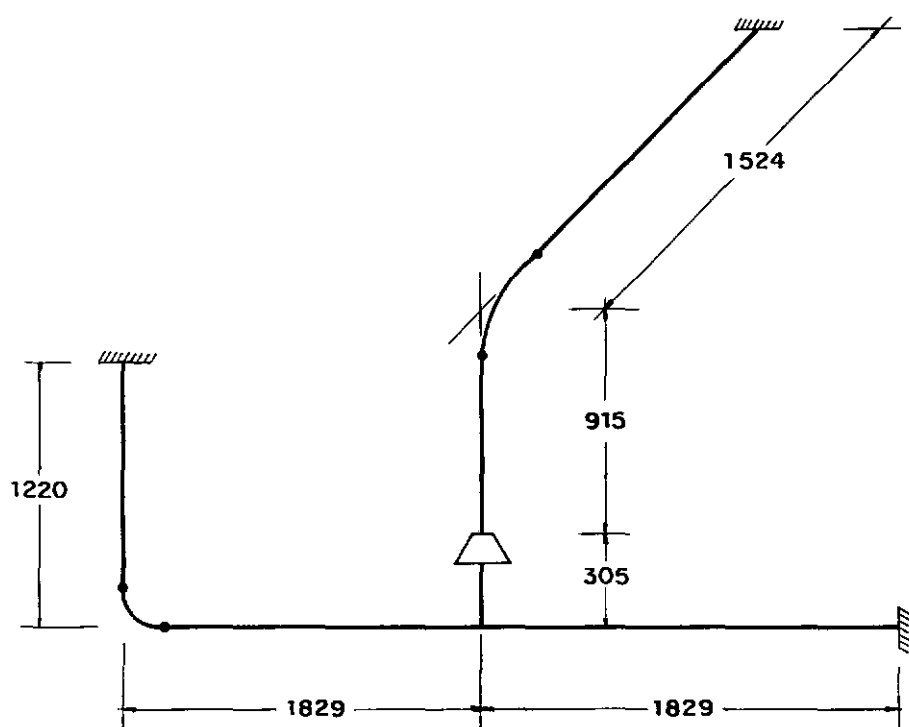


Figura (V.1) - Primeira aplicação

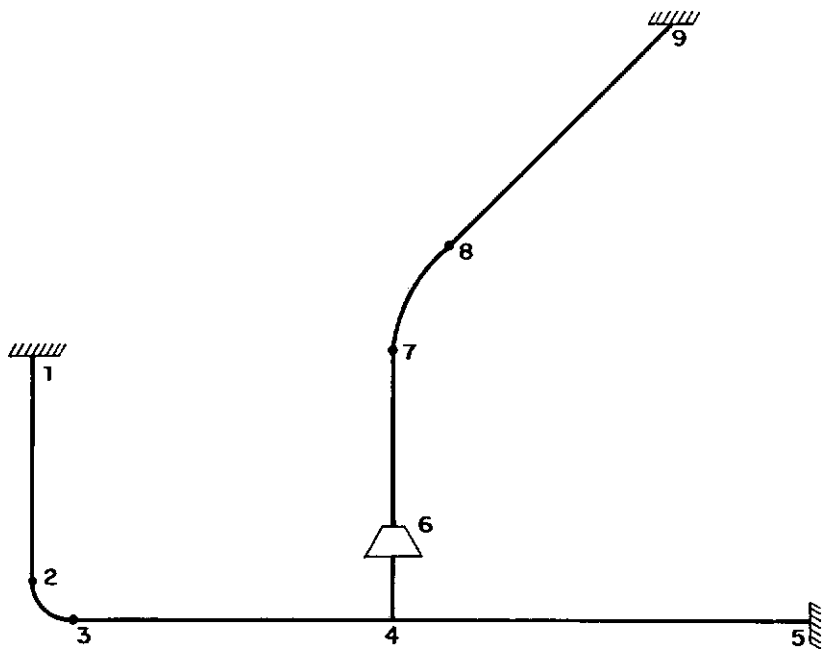
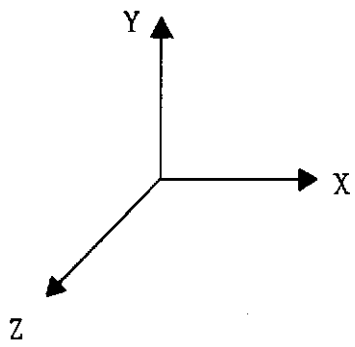


Figura (V.2) - Pontos nodais

# Listagem dos resultados da primeira aplicação

NUMERO DE NOS - 9  
NUMERO DE ELEMENTOS - 8  
NUMERO DE TIPOS DE TUBO - 2  
NUMERO DE NOS COM DIRECOES RESTRINGIDAS - 3  
NUMERO DE TES - 1  
MODULO DE ELASTICIDADE (daN/mm<sup>2</sup>) - 20000  
TEMPERATURA DE TRABALHO (graus C) - 121  
DILATACAO UNITARIA (1/graus C) - 1.2376E-05

## COORDENADAS DOS NOS (mm)

\*\*\*\*\*

NO	X	Y	Z
1	-1829	1220	0
2	-1829	381	0
3	-1448	0	0
4	0	0	0
5	1829	0	0
6	0	305	0
7	0	915	0
8	0	1220	-305
9	0	1220	-1524

# MATRIZ DE INCIDENCIA

\*\*\*\*\*

ELEMENTO	INI	FIN	SECAO	TIPO
1	1	2	1	RET
2	2	3	1	CUR
3	3	4	1	RET
4	4	5	1	RET
5	4	6	1	RET
6	6	7	2	RET
7	7	8	2	CUR
8	8	9	1	RET

## DESLOCAMENTOS PRESCRITOS NOS APOIOS RESTRINGIDOS (mm e rad)

\*\*\*\*\*

NO	DX	DY	DZ	TX	TY	TZ
1	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0

## CARACTERISTICAS GEOMETRICAS (mm)

\*\*\*\*\*

SECAO	DIAMETRO	ESPESSURA
1	273	9.27
2	219	8.18

## DESLOCAMENTOS DOS NOS (mm e rad)

\*\*\*\*\*

NO	DESLOC X	DESLOC Y	DESLOC Z	ROTACAO X	ROTACAO Y	ROTACAO Z
1	-0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	-0.00000	-0.00000
2	-2.57572	-1.03745	-0.01902	0.00009	-0.00018	-0.00423
3	-3.80563	-2.63940	-0.07794	0.00056	-0.00023	-0.00016
4	-2.11161	-1.73882	0.25155	0.00107	-0.00014	0.00073
5	-0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
6	-2.23600	-1.35828	0.61888	0.00125	-0.00031	0.00027
7	-1.97928	-0.59779	1.53527	0.00153	-0.00110	-0.00065
8	-1.23448	0.00559	1.51476	0.00008	-0.00143	-0.00063
9	0.00000	0.00000	0.00000	-0.00000	-0.00000	-0.00000

## ESFORÇOS NAS EXTREMIDADES DOS ELEMENTOS NO SISTEMA LOCAL (daN)

\*\*\*\*\*

ELEMENTO	FxD	FyD	FzD	FxE	FyE	FzE
1	2066	12300	-279	-2066	-12300	279
2	10158	-7237	279	-10158	7237	-279
3	12300	-2066	-279	-12300	2066	279
4	14664	-2420	851	-14664	2420	-851
5	355	2363	-1130	-355	-2363	1130
6	355	2363	-1130	-355	-2363	1130
7	1049	-548	-2363	-1049	548	2363
8	1130	355	-2363	-1130	-355	2363

# MOMENTOS NAS EXTREMIDADES DOS ELEMENTOS NO SISTEMA LOCAL (daN.mm)

\*\*\*\*\*

ELEMENTO	MxD	MyD	MzD	MxE	MyE	MzE
1	-226273	-24336	11899400	226273	258275	-1579480
2	-342627	22630	-1579470	342627	-172864	-2319850
3	-364507	120037	-2319830	364507	283708	-670986
4	601246	-878735	-1680610	-601246	-677873	-2745890
5	595028	965781	2351580	-595028	-621111	-1630810
6	595033	621161	1630800	-595033	68114	-189203
7	286960	554506	68146	-286960	464819	-304561
8	531612	-125749	304543	-531612	3006650	127878

## REACOES DE APOIO (daN e daN.mm)

\*\*\*\*\*

NO	FX	FY	FZ	MX	MY	MZ
1	12300	-2066	-279	-24336	226273	11899400
5	-14664	2420	-851	-601246	-677873	-2745890
9	2363	-355	1130	127878	3006650	531612

## TENSOES NOS ELEMENTOS (daN/mm2)

\*\*\*\*\*

ELEMENTO	SIGMA <sub>d</sub>	SIGMA <sub>e</sub>
1	24.30	3.30
2	8.51	12.38
3	4.80	1.66
4	4.06	5.90
5	5.33	3.76
6	6.70	2.28
7	3.63	4.00
8	1.28	6.24

# CARACTERISTICAS DAS CURVAS

\*\*\*\*\*

ELEMENTO	RAIO(mm)	ANGULO	TIPO	XX(mm)	YY(mm)	ZZ(mm)	FATOR FLEX.	FITIN	FITOUT
2	381	90	NORMAL	-1829	0	0	8.12	2.60	2.17
7	305	90	NORMAL	0	1220	0	7.35	2.44	2.03

## TENSOES INTENSIFICADAS NOS TES (daN/mm2)

\*\*\*\*\*

NO	TE	ELEMENTO	TENSAO	FITIN	FITOUT
4	1	3	2.73	1.73	1.97
4	1	4	7.00	1.73	1.97
4	1	5	9.23	1.73	1.97

## TENSAO MAXIMA DE 24.30 daN/mm2 NO ELEMENTO 1

\*\*\*\*\*



## 5.2 - SEGUNDA APLICAÇÃO

Sistema de tubulação mostrado na figura (V.3) .

- Temperatura (300 °C)
- Tipo de seção reta:  $D_e = 273\text{mm}$  ;  $t_n = 9,27\text{mm}$
- Tê do nó 6 -  $i_i = 2,0$  ;  $i_o = 1,8$
- Tê do nó 10 - Forjado, fabricado de acordo com a Norma ANSI B 16.9.
- Demais condições iguais às da primeira aplicação.

Os nós estão numerados na figura (V.4) e os resultados mostrados a seguir. A tensão admissível obtida pela fórmula (III.8) é igual a  $16,35 \text{ daN/mm}^2$ , o que nos leva à conclusão que o nosso sistema também não é flexível.

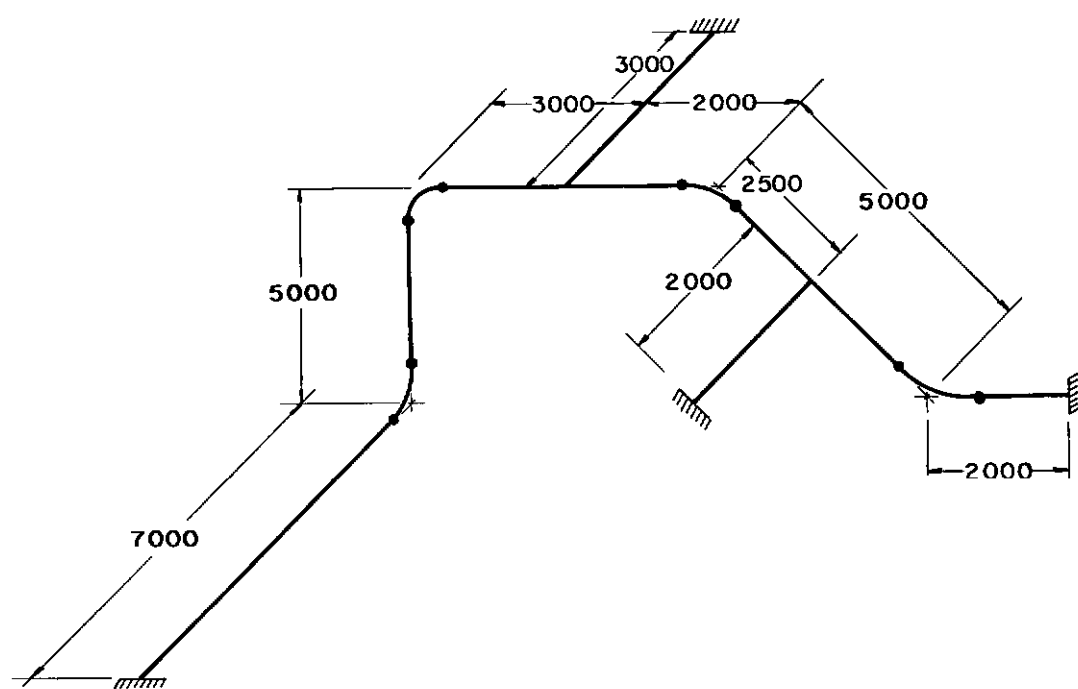


Figura (V.3) - Segunda aplicação

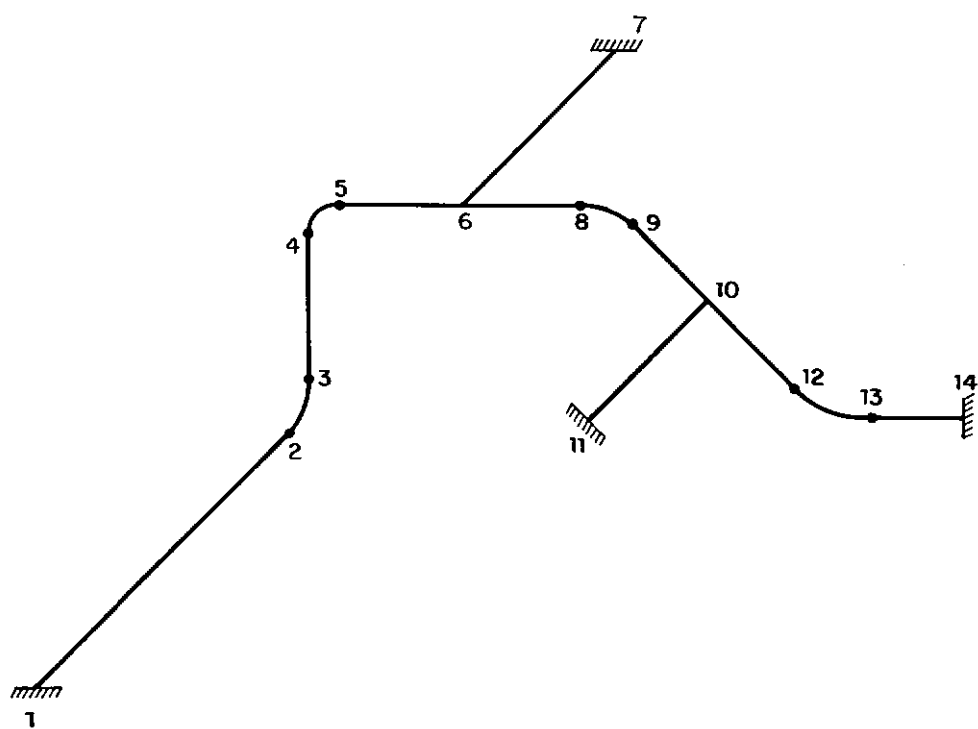
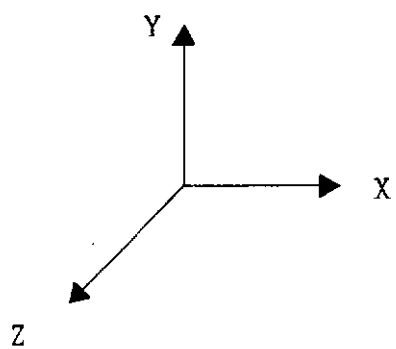


Figura (V.4) - Pontos nodais

# Listagem dos resultados da segunda aplicação

NUMERO DE NOS - 14  
NUMERO DE ELEMENTOS - 13  
NUMERO DE TIPOS DE TUBO - 1  
NUMERO DE NOS COM DIRECOES RESTRINGIDAS - 4  
NUMERO DE TES - 2  
MODULO DE ELASTICIDADE (daN/mm<sup>2</sup>) - 20000  
TEMPERATURA DE TRABALHO (graus C) - 300  
DILATACAO UNITARIA (1/graus C) - 1.2376E-05

## COORDENADAS DOS NOS (mm)

\*\*\*\*\*

NO	X	Y	Z
1	-3000	-5000	7000
2	-3000	-5000	381
3	-3000	-4619	0
4	-3000	-381	0
5	-2619	0	0
6	0	0	0
7	0	0	-3000
8	1842	0	0
9	2112	-112	0
10	3768	-1768	0
11	2354	-3182	0
12	5424	-4888	0
13	5694	-5000	0
14	7536	-5000	0

\*\*\*\*\*

[illegible]

NO	DX	DY	DZ	TX	TY	TZ
1	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0

\*\*\*\*\*

SECAO	DIAMETRO	ESPESSURA
1	273	9,27

## DESLOCAMENTOS DOS NOS (mm e rad)

\*\*\*\*\*

NO	DESLOC X	DESLOC Y	DESLOC Z	ROTACAO X	ROTACAO Y	ROTACAO Z
1	-0.00000	-0.00000	0.00000	-0.00000	0.00000	0.00000
2	-3.64887	-17.09800	-22.90900	-0.00196	-0.00003	0.00329
3	-4.66572	-15.73190	-23.57270	0.00378	-0.00109	0.00356
4	-20.75540	-1.06217	-3.45836	0.00423	-0.00425	0.00356
5	-20.56860	1.22910	-0.73896	0.00207	-0.00425	0.00208
6	-11.49670	7.18210	10.34600	-0.00166	-0.00362	0.00301
7	0.00004	-0.00000	0.00000	-0.00000	-0.00000	0.00000
8	-5.15702	14.14060	12.50600	0.00145	0.00034	0.00355
9	-4.04959	14.34390	11.87480	0.00276	0.00248	0.00056
10	1.40882	8.41177	3.00664	0.00291	0.00054	-0.00000
11	0.00001	-0.00000	0.00004	0.00000	-0.00000	0.00000
12	-7.22498	-9.71059	-0.93536	0.00045	-0.00056	-0.00307
13	-6.27506	-9.53526	-0.80136	0.00032	-0.00065	0.00593
14	-0.00001	-0.00000	0.00004	0.00000	-0.00000	0.00000

## ESFORÇOS NAS EXTREMIDADES DOS ELEMENTOS NO SISTEMA LOCAL (daN)

\*\*\*\*\*

ELEMENTO	FxD	FyD	FzD	FxE	FyE	FzE
1	643	581	206	-643	-581	-206
2	864	44	-205	-864	-44	205
3	584	-205	-643	-584	205	643
4	561	267	-641	-561	-267	641
5	211	586	-641	-211	-586	641
6	2550	2628	-3397	-2550	-2628	3397
7	3619	-2043	1909	-3619	2043	-1909
8	4154	-497	1908	-4154	497	-1908
9	4009	2018	908	-4009	-2018	-908
10	-1128	-5788	6973	1128	5788	-6973
11	12204	2505	-2806	-12204	-2505	2806
12	11738	4886	443	-11738	-4886	-443
13	9007	-9023	-447	-9007	9023	447

# MOMENTOS NAS EXTREMIDADES DOS ELEMENTOS NO SISTEMA LOCAL (daN.mm)

\*\*\*\*\*

ELEMENTO	MxD	MyD	MzD	MxE	MyE	MzE
1	511166	-673579	2316780	-511166	-687379	1526250
2	847504	-124607	1526460	-847504	235261	-1502910
3	765615	1502840	-432922	-765615	1220890	-437024
4	1404620	-322179	436951	-1404620	667602	-293224
5	1465500	521061	293196	-1465500	1158610	1241080
6	-1031120	3479330	3201980	1031120	6710370	4683330
7	-1736470	-4638120	-2272210	1736470	1121880	-1490250
8	-1180000	-1701560	1489940	1180000	1143890	-1635230
9	-649596	-285604	2205150	649596	-1841150	2520640
10	-1252340	-6057040	-6435480	1252340	-7886110	-5139610
11	54852	6485180	4620670	-54852	3425770	4227040
12	189877	-142640	5436420	-189877	13252	-4008300
13	179996	-60769	-4007860	-179996	884182	-12612800

## REACOES DE APOIO (daN e daN.mm)

\*\*\*\*\*

NO	FX	FY	FZ	MX	MY	MZ
1	206	581	-643	2316780	-673579	-511166
7	3397	-2628	2550	4683330	6710370	-1031120
11	5391	-6986	-2351	-3340350	1569280	-8749520
14	-9007	9023	447	-179996	884182	-12612800

# TENSOES NOS ELEMENTOS (daN/mm2)

\*\*\*\*\*

ELEMENTO	SIGMA <sub>d</sub>	SIGMA <sub>e</sub>
1	5.04	3.57
2	8.86	8.41
3	3.56	3.07
4	6.72	4.38
5	3.23	4.58
6	9.88	16.84
7	11.12	5.20
8	10.36	11.31
9	4.73	6.51
10	18.22	19.39
11	16.26	11.11
12	28.93	21.32
13	8.19	25.82

# CARACTERISTICAS DAS CURVAS

\*\*\*\*\*

ELEMENTO	RAIO (mm)	ANGULO	TIPO	XX (mm)	YY (mm)	ZZ (mm)	FATOR FLEX.	FITIN	FITOUT
2	381	90	NORMAL	-3000	-5000	0	0.00	2.60	2.17
4	381	90	NORMAL	-3000	0	0	0.00	2.60	2.17
8	381	45	NORMAL	2000	0	0	0.00	2.60	2.17
12	381	45	NORMAL	5536	-5000	0	0.00	2.60	2.17



# TENSOES INTENSIFICADAS NOS TES (daN/mm2)

\*\*\*\*\*

NO	TE	ELEMENTO	TENSAO	FITIN	FITOUT
6	1	5	7.22	2.00	1.80
6	1	6	18.57	2.00	1.80
6	1	7	21.00	2.00	1.80
10	2	9	12.61	1.97	1.97
10	2	10	35.60	1.97	1.97
10	2	11	31.99	1.97	1.97

TENSAO MAXIMA DE 35.60 daN/mm2 NO ELEMENTO 10

\*\*\*\*\*

### 5.3 - TERCEIRA APLICAÇÃO

Sistema de tubulação mostrado na figura (V.5) .

- Temperatura (200 °C)
- Tipos de seção reta:  $D_e = 324\text{mm}$  ;  $t_n = 12,7\text{mm}$  e  
 $D_e = 273\text{mm}$  ;  $t_n = 9,27\text{mm}$
- Tês forjados fabricados de acordo com ANSI B 16.9
- Curvas normais de raio longo
- Demais condições iguais às da primeira aplicação

Os nós estão numerados na figura (V.6) e os resultados mostrados a seguir. A tensão admissível obtida pela fórmula (III.8) é igual a  $16,6 \text{ daN/mm}^2$ , o que nos leva à conclusão que o nosso sistema é flexível.

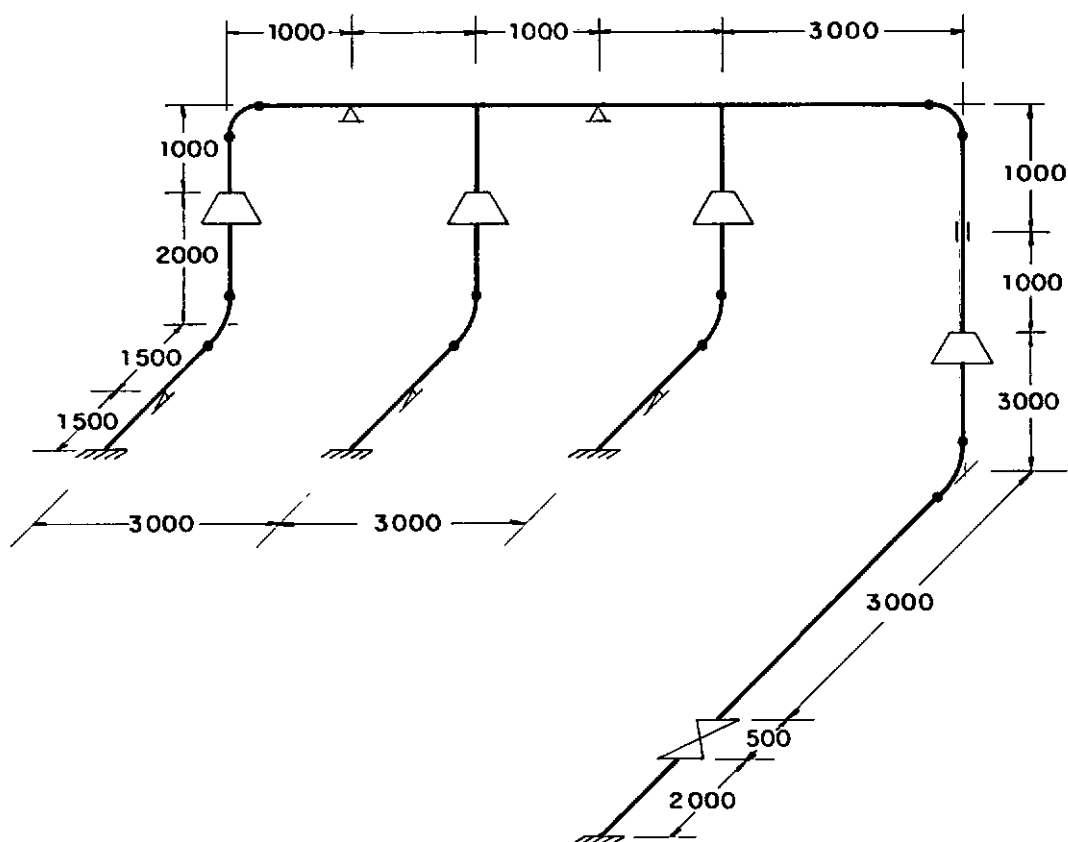


Figura (V.5) - Terceira aplicação

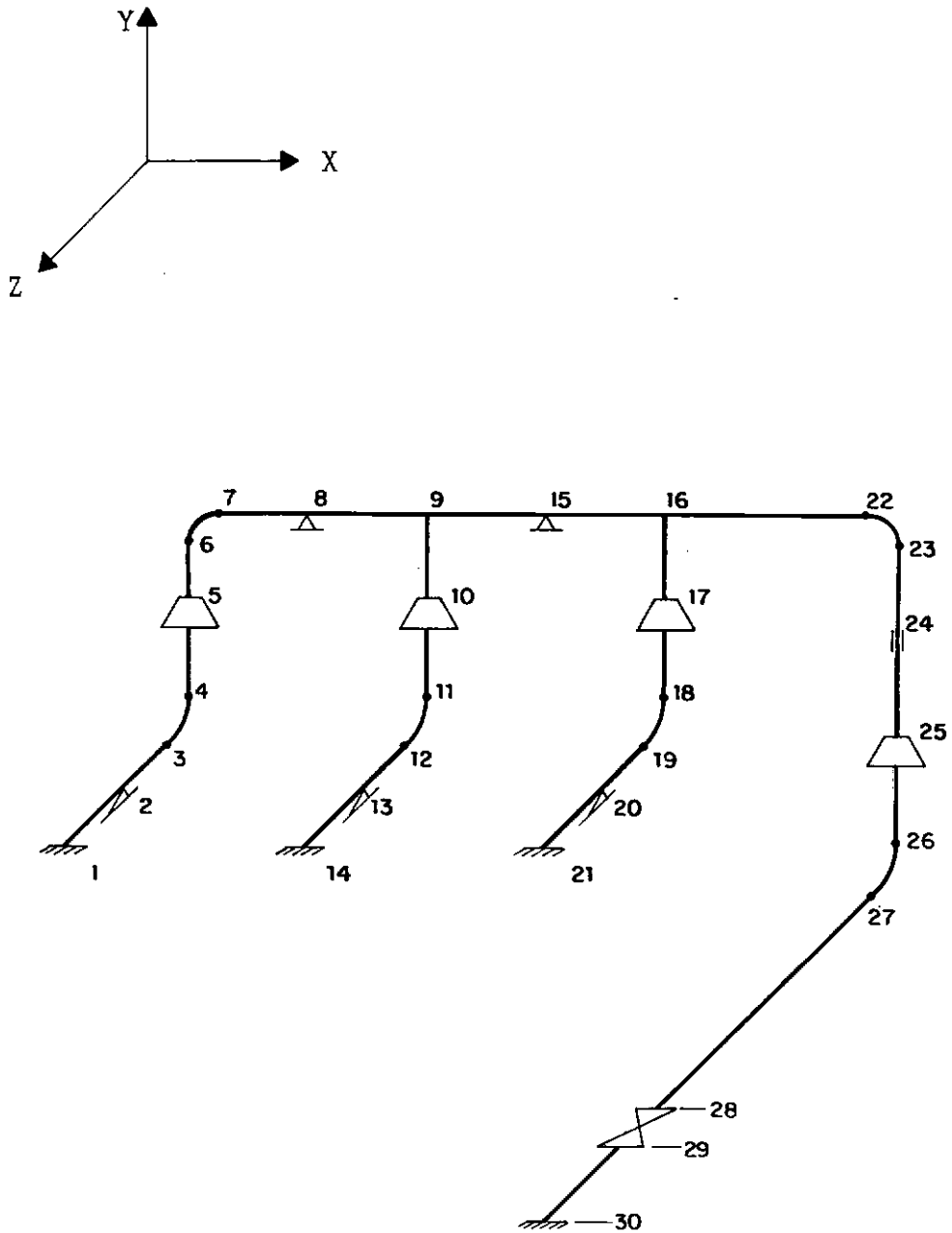


Figura (V.6) - Pontos nodais

## Listagem dos resultados da terceira aplicação

NUMERO DE NOS - 30  
NUMERO DE ELEMENTOS - 29  
NUMERO DE TIPOS DE TUBO - 2  
NUMERO DE NOS COM DIRECOES RESTRINGIDAS - 10  
NUMERO DE TES - 2  
MODULO DE ELASTICIDADE (daN/mm<sup>2</sup>) - 20000  
TEMPERATURA DE TRABALHO (graus C) - 200  
DILATACAO UNITARIA (1/graus C) - 1.2376E-05

## COORDENADAS DOS NOS (mm)

\*\*\*\*\*

NO	X	Y	Z
1	-3000	-3000	3000
2	-3000	-3000	1500
3	-3000	-3000	457
4	-3000	-2543	0
5	-3000	-1000	0
6	-3000	-381	0
7	-2519	0	0
8	-2000	0	0
9	0	0	0
10	0	-1000	0
11	0	-2543	0
12	0	-3000	457
13	0	-3000	1500
14	0	-3000	3000
15	1000	0	0
16	3000	0	0
17	3000	-1000	0
18	3000	-2543	0
19	3000	-3000	457
20	3000	-3000	1500
21	3000	-3000	3000
22	5543	0	0
23	6000	-381	0
24	6000	-1000	0
25	6000	-2000	0
26	6000	-4619	0
27	6000	-5000	381
28	6000	-5000	3000
29	6000	-5000	3500
30	6000	-5000	5500

MATRIZ DE INCIDENCIA

\*\*\*\*\*

ELEMENTO	INI	FIN	SECAO	TIPO
1	1	2	1	RET
2	2	3	1	RET
3	3	4	1	CUR
4	4	5	1	RET
5	5	6	2	RET
6	6	7	2	CUR
7	7	8	2	RET
8	8	9	2	RET
9	9	10	2	RET
10	10	11	1	RET
11	11	12	1	CUR
12	12	13	1	RET
13	13	14	1	RET
14	9	15	2	RET
15	15	16	2	RET
16	16	17	2	RET
17	17	18	1	RET
18	18	19	1	CUR
19	19	20	1	RET
20	20	21	1	RET
21	16	22	2	RET
22	22	23	2	CUR
23	23	24	2	RET
24	24	25	2	RET
25	25	26	1	RET
26	26	27	1	CUR
27	27	28	1	RET
28	28	29	1	INF
29	29	30	1	RET

DESLOCAMENTOS PRESCRITOS NOS APOIOS RESTRINGIDOS (mm e rad)

[illegible]

NO	DX	DY	DZ	TX	TY	TZ
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0

CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS (mm)

\*\*\*\*\*

SECAO	DIAMETRO	ESPESSURA
1	324	12.7
2	273	9.27



## DESLOCAMENTOS DOS NOS (mm e rad)

\*\*\*\*\*

NO	DESLOC X	DESLOC Y	DESLOC Z	ROTACAO X	ROTACAO Y	ROTACAO Z
1	-0.00000	-0.00000	0.00000	-0.00000	0.00000	0.00000
2	-1.00353	-0.58084	-3.33957	-0.00062	0.00112	0.00162
3	-2.34975	-1.27988	-5.66168	-0.00063	0.00133	0.00275
4	-4.77218	-0.38950	-6.65667	0.00050	0.00194	0.00469
5	-12.53470	3.04191	-5.64224	0.00076	0.00148	0.00515
6	-15.69550	4.41702	-5.13997	0.00083	0.00107	0.00491
7	-16.19970	6.17941	-4.89768	0.00143	-0.00020	0.00093
8	-14.82600	6.61365	-4.69778	0.00139	-0.00041	0.00058
9	-10.38780	7.97350	-3.64476	0.00125	-0.00046	0.00131
10	-8.24046	5.74361	-4.78380	0.00104	0.00050	0.00271
11	-3.83856	2.30421	-6.30158	0.00094	0.00116	0.00275
12	-2.25042	0.94225	-5.66557	0.00061	0.00121	0.00180
13	-0.98314	0.37594	-3.34186	0.00045	0.00108	0.00106
14	0.00000	0.00000	-0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
15	-8.17788	8.92170	-2.94723	0.00147	-0.00088	0.00070
16	-3.75822	10.11060	-0.77854	0.00193	-0.00113	0.00084
17	-2.70272	7.87602	-2.73755	0.00198	-0.00052	0.00119
18	-0.86172	4.43213	-5.80211	0.00198	-0.00009	0.00112
19	-0.43032	2.57354	-5.66443	0.00160	0.00015	0.00078
20	-0.21692	1.04656	-3.34119	0.00122	0.00021	0.00046
21	-0.00002	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
22	1.85347	11.33580	2.76312	0.00226	-0.00137	-0.00027
23	1.97812	9.78943	1.90704	0.00301	-0.00028	-0.00321
24	0.00002	8.41233	-0.00000	0.00319	-0.00003	-0.00281
25	-2.16088	6.18765	-3.32115	0.00336	0.00037	-0.00159
26	-5.07998	0.35825	-11.58780	0.00274	0.00083	-0.00082
27	-4.85228	-0.84015	-11.39350	0.00036	0.00127	-0.00038
28	-1.61888	-0.62172	-5.56466	-0.00033	0.00102	-0.00017
29	-1.11368	-0.45467	-4.45098	-0.00033	0.00100	-0.00016
30	0.00002	0.00000	0.00000	-0.00000	0.00000	-0.00000

# ESFORÇOS NAS EXTREMIDADES DOS ELEMENTOS NO SISTEMA LOCAL (daN)

\*\*\*\*\*

ELEMENTO	FxD	FyD	FzD	FxE	FyE	FzE
1	324	950	1304	-324	-950	-1304
2	324	950	1304	-324	-950	-1304
3	901	-443	-1304	-901	443	1304
4	950	-1304	-324	-950	1304	324
5	950	-1304	-324	-950	1304	324
6	1588	-250	-324	-1588	250	324
7	1315	949	-324	-1315	-949	324
8	1313	949	-324	-1313	-949	324
9	-339	-1403	-56	339	1403	56
10	-336	-1403	-56	336	1403	56
11	-278	-199	-1403	278	199	1403
12	-56	337	1403	56	-337	-1403
13	-56	337	1403	56	-337	-1403
14	2734	610	-267	-2734	-610	267
15	2742	610	-267	-2742	-610	267
16	-1065	-469	55	1065	469	-55
17	-1059	-470	55	1059	470	-55
18	-710	-788	-472	710	788	472
19	55	1060	470	-55	-1060	-470
20	55	1060	471	-55	-1060	-471
21	3219	-456	-322	-3219	456	322
22	2448	1737	-327	-2448	-1737	327
23	457	3215	-322	-457	-3215	322
24	461	-413	515	-461	413	-515
25	464	-415	515	-464	415	-515
26	691	-36	-416	-691	36	416
27	514	-463	417	-514	463	-417
28	556	-459	406	-556	459	-406
29	544	-462	438	-544	462	-438

# MOMENTOS NAS EXTREMIDADES DOS ELEMENTOS NO SISTEMA LOCAL (daN.mm)

\*\*\*\*\*

ELEMENTO	MxD	MyD	MzD	MxE	MyE	MzE
1	2503330	-3231030	1951450	-2503330	1275100	-526067
2	2503310	-1275040	526046	-2503310	-84724	464978
3	1830090	1710070	465007	-1830090	-867435	-751240
4	680724	751237	-1907390	-680724	-251599	-104258
5	680715	251600	103775	-680715	-51187	-911220
6	445170	517530	911344	-445170	-343035	-1046040
7	72201	557348	1045850	-72201	-356916	-458701
8	72202	356914	458695	-72202	290639	1438400
9	991791	304912	-2567080	-991791	-248488	1164340
10	991796	248432	-1164500	-991796	-161453	-999634
11	1408180	-5544	161438	-1408180	912374	-289782
12	1640830	-350694	-289777	-1640830	-1112790	641566
13	1640860	1112720	-641571	-1640860	-3217750	1147530
14	-232729	701138	1128540	232729	-433895	-518630
15	-232719	433886	518638	232719	100536	701159
16	635111	-99800	-702570	-635111	44773	233635
17	635102	-44802	-233388	-635102	-40348	-491981
18	796979	101701	40325	-796979	203181	-549689
19	706845	-419692	-549713	-706845	-70078	1655160
20	706848	70546	-1655110	-706848	-777027	3244730
21	-132884	534579	1772	132884	285287	-1160690
22	136264	-309328	1179930	-136264	503902	-146480
23	409962	-282402	144428	-409962	481622	1845490
24	409963	-481592	-1844980	-409963	-33292	1431880
25	409962	33304	-1431650	-409962	-1382220	345581
26	45421	534504	1382430	-45421	-310264	-1402110
27	-187435	-251703	-1402120	187435	-839396	189223
28	-187437	839973	-187262	187437	-1043070	-42564
29	-187428	1067000	40130	187428	-1942670	-964062

# REACOES DE APOIO (daN e daN.mm)

\*\*\*\*\*

NO	FX	FY	FZ	MX	MY	MZ
1	1304	950	-324	1951450	-3231030	-2503330
2	-0	-0	-0	-22	55	24
8	-1	-0	0	1	-2	-6
13	-0	0	0	5	-77	26
14	1403	-337	56	-1147530	-3217750	-1640860
15	8	-0	0	10	-9	9
20	-1	-0	-0	-50	468	2
21	471	-1060	-55	-3244730	-777027	-706848
24	-3628	-4	837	30	-1	513
30	438	462	-544	964062	-1942670	187428

TENSOES NOS ELEMENTOS (daN/mm2)

\*\*\*\*\*

ELEMENTO	SIGMA <sub>d</sub>	SIGMA <sub>e</sub>
1	4.87	3.07
2	3.07	2.74
3	3.58	5.07
4	2.32	0.79
5	1.50	2.32
6	5.20	6.29
7	2.42	1.20
8	1.20	3.00
9	5.65	3.16
10	1.67	1.52
11	2.61	2.33
12	1.83	2.24
13	2.24	4.07
14	2.75	1.46
15	1.46	1.52
16	1.94	1.38
17	0.73	0.86
18	1.35	1.87
19	1.06	1.94
20	1.94	3.67
21	1.12	2.46
22	6.53	2.21
23	1.06	3.98
24	3.98	3.04
25	1.60	1.59
26	3.65	3.59
27	1.54	0.95
28	E L E M E N T O	I N F L E X I V E L
29	1.17	2.34

# CARACTERISTICAS DAS CURVAS

\*\*\*\*\*

ELEMENTO	RAIO(mm)	ANGULO	TIPO	XX(mm)	YY(mm)	ZZ(mm)	FATOR FLEX.	FITIN	FITOUT
3	457	90	NORMAL	-3000	-3000	0	0.00	2.33	1.94
6	381	90	NORMAL	-3000	0	0	0.00	2.60	2.17
11	457	90	NORMAL	0	-3000	0	0.00	2.33	1.94
18	457	90	NORMAL	3000	-3000	0	0.00	2.33	1.94
22	381	90	NORMAL	6000	0	0	0.00	2.60	2.17
26	457	90	NORMAL	6000	-5000	0	0.00	2.33	1.94

## TENSOES INTENSIFICADAS NOS TES (daN/mm2)

\*\*\*\*\*

NO	TE	ELEMENTO	TENSAO	FITIN	FITOUT
9	1	8	5.20	1.73	1.97
9	1	9	9.35	1.73	1.97
9	1	14	4.90	1.73	1.97
16	2	15	2.55	1.73	1.97
16	2	16	2.82	1.73	1.97
16	2	21	2.16	1.73	1.97

TENSAO MAXIMA DE 9.35 daN/mm2 NO ELEMENTO 9

\*\*\*\*\*

#### 5.4 - QUARTA APLICAÇÃO

Sistema de tubulação mostrado na figura (V.7) .

- Material (API 5L Gr. B)
- Demais condições iguais às da terceira aplicação

Os nós estão numerados na figura (V.8) e os resultados mostrados a seguir. A tensão admissível obtida pela fórmula (III.8) é igual a  $20,22 \text{ daN/mm}^2$ , o que nos leva à conclusão que o sistema é flexível.

Este exemplo é bastante instrutivo para análise de suportes normais na determinação das tensões secundárias. Em 4 e 11 foi deixada livre a direção vertical Y. Se os deslocamentos nessa direção fossem positivos, o nosso problema estaria resolvido, pois os suportes normais não impedem movimentos para cima. Entretanto encontramos deslocamentos negativos nesses nós, o que não é possível, pois os suportes não permitem deslocamentos para baixo. Para determinar então a tensão efetiva na tubulação, devemos rodar novamente o Programa, colocando a direção Y dos nós 4 e 11 impedidas de se deslocar. Isso será feito na quinta aplicação.

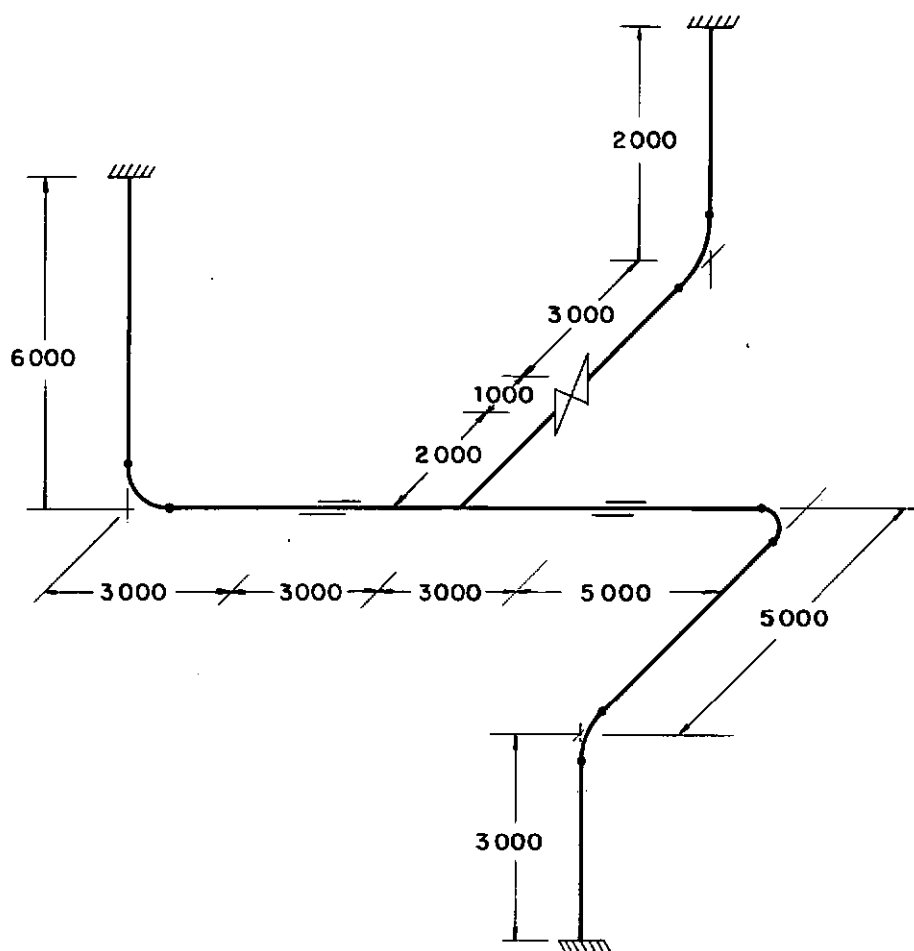


Figura (V.7) - Quarta e quinta aplicações



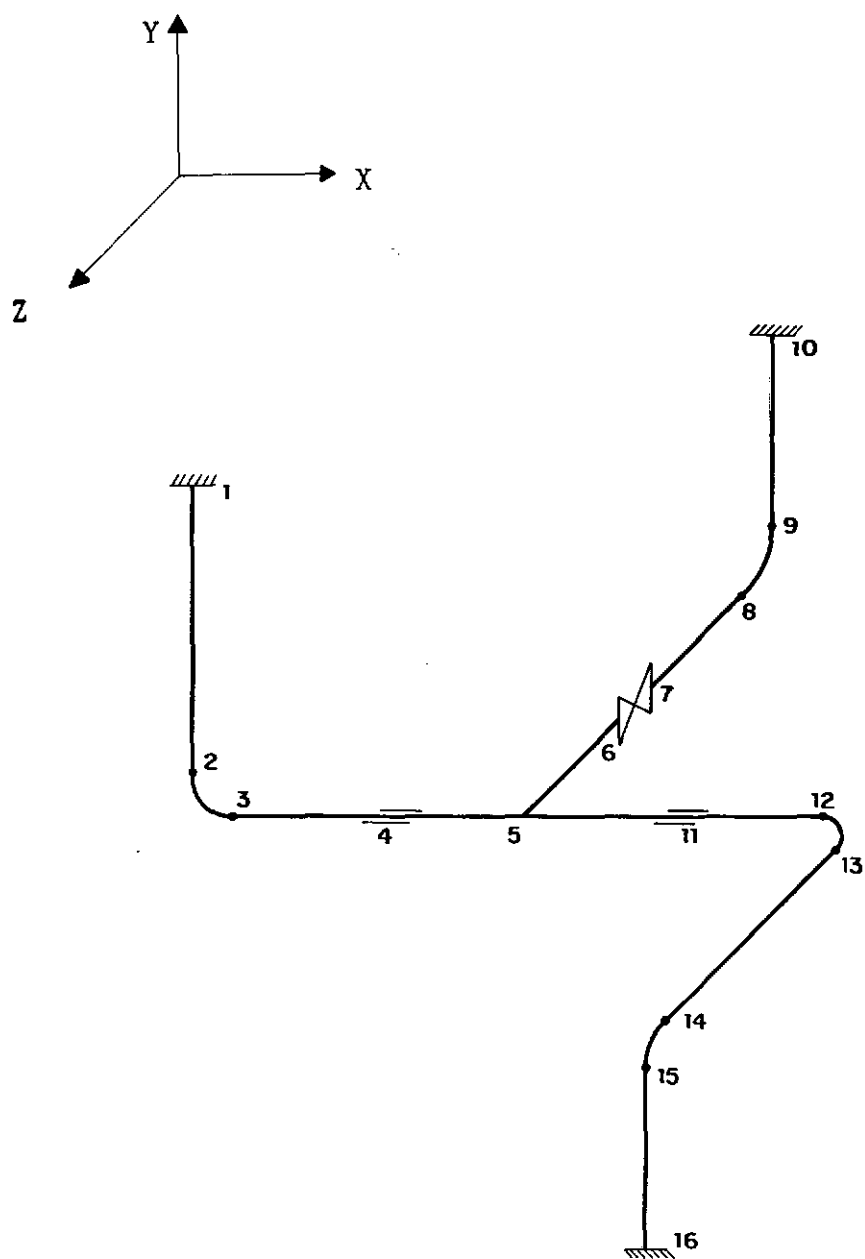


Figura (V.8) - Pontos nodais

# Listagem dos resultados da quarta aplicação

NUMERO DE NOS - 16  
NUMERO DE ELEMENTOS - 15  
NUMERO DE TIPOS DE TUBO - 2  
NUMERO DE NOS COM DIRECOES RESTRINGIDAS - 5  
NUMERO DE TES - 1  
MODULO DE ELASTICIDADE (daN/mm2) - 20000  
TEMPERATURA DE TRABALHO (graus C) - 200  
DILATAÇAO UNITARIA (1/graus C) - 1.2376E-05

## COORDENADAS DOS NOS (mm)

\*\*\*\*\*

NO	X	Y	Z
1	-6000	6000	0
2	-6000	457	0
3	-5543	0	0
4	-3000	0	0
5	0	0	0
6	0	0	-2000
7	0	0	-3000
8	0	0	-4619
9	0	381	-5000
10	0	2000	-5000
11	3000	0	0
12	7543	0	0
13	8000	0	457
14	8000	0	4543
15	8000	-457	5000
16	8000	-3000	5000

# MATRIZ DE INCIDENCIA

\*\*\*\*\*

ELEMENTO	INI	FIN	SECAO	TIPO
1	1	2	1	RET
2	2	3	1	CUR
3	3	4	1	RET
4	4	5	1	RET
5	5	6	2	RET
6	6	7	2	INF
7	7	8	2	RET
8	8	9	2	CUR
9	9	10	1	RET
10	5	11	1	RET
11	11	12	1	RET
12	12	13	1	CUR
13	13	14	1	RET
14	14	15	1	CUR
15	15	16	1	RET

## DESLOCAMENTOS PRESCRITOS NOS APOIOS RESTRINGIDOS (mm e rad)

\*\*\*\*\*

NO	DX	DY	DZ	TX	TY	TZ
1	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0

## CARACTERISTICAS GEOMETRICAS (mm)

\*\*\*\*\*

SECAO	DIAMETRO	ESPESSURA
1	324	12.7
2	273	9.27

## DESLOCAMENTOS DOS NOS (mm e rad)

\*\*\*\*\*

NO	DESLOC X	DESLOC Y	DESLOC Z	ROTACAO X	ROTACAO Y	ROTACAO Z
1	-0.00000	0.00000	0.00000	-0.00000	-0.00000	-0.00000
2	-12.77650	-12.34710	-0.00624	0.00004	-0.00004	-0.00298
3	-12.82010	-14.16520	-0.02869	0.00011	-0.00001	-0.00095
4	-7.16466	-15.12690	0.00000	0.00019	-0.00000	0.00017
5	-0.49292	-12.76760	3.59593	0.00030	-0.00002	0.00138
6	-0.26252	-11.29240	-0.74371	0.00132	-0.00018	0.00090
7	-0.08502	-9.92085	-2.96313	0.00143	-0.00018	0.00086
8	0.16718	-6.31082	-6.47609	0.00313	-0.00010	0.00047
9	0.06868	-3.60493	-5.19795	0.00476	-0.00009	0.00010
10	-0.00002	0.00000	0.00000	0.00000	-0.00000	0.00000
11	6.17812	-6.99247	0.00000	-0.00014	0.00000	0.00231
12	16.28030	3.64772	-8.16866	-0.00082	0.00176	0.00202
13	16.85080	4.69932	-7.26478	-0.00067	-0.00258	0.00122
14	2.74103	6.89932	1.81198	-0.00012	-0.00337	-0.00057
15	1.26082	5.66187	2.47148	0.00128	-0.00210	-0.00059
16	0.00002	-0.00002	0.00000	0.00000	-0.00000	-0.00000

# ESFORÇOS NAS EXTREMIDADES DOS ELEMENTOS NO SISTEMA LOCAL (daN)

\*\*\*\*\*

ELEMENTO	FxD	FyD	FzD	FxE	FyE	FzE
1	43	936	-19	-43	-936	19
2	694	-632	19	-694	632	-19
3	938	-43	-19	-938	43	19
4	936	-43	-4404	-936	43	4404
5	8888	258	-58	-8888	-258	58
6	8882	258	-58	-8882	-258	58
7	8886	258	-58	-8886	-258	58
8	6465	6101	58	-6465	-6101	-58
9	258	58	-8886	-258	-58	8886
10	994	-301	4483	-994	301	-4483
11	995	-301	1552	-995	301	-1552
12	1806	-393	-301	-1806	393	301
13	1553	-301	-996	-1553	301	996
14	1306	885	-995	-1306	-885	995
15	303	996	1553	-303	-996	-1553

# MOMENTOS NAS EXTREMIDADES DOS ELEMENTOS NO SISTEMA LOCAL (daN.mm)

\*\*\*\*\*

ELEMENTO	MxD	MyD	MzD	MxE	MyE	MzE
1	-15601	33858	4215290	15601	72700	974325
2	-62438	40376	974051	62438	-52799	-1382340
3	-81486	6816	-1382450	81486	42071	1273060
4	-81487	6627530	-1273080	81487	6584620	1143980
5	-247114	161818	-424479	247114	-44864	940454
6	-247109	45254	-940511	247109	13223	1198050
7	-247114	-13002	-1198220	247114	106896	1615790
8	-250342	-99203	1615790	250342	67843	1671460
9	-129000	-1671510	224648	129000	16057800	-131399
10	342997	-6746320	-1391150	-342997	-6703380	488075
11	342996	-4693780	-488153	-342996	-2359160	-879393
12	864301	-379356	2358950	-864301	573628	-2612990
13	1016840	2613570	-205481	-1016840	1455050	-1023870
14	1747910	-309898	1024390	-1747910	953294	-452123
15	1910070	-451879	561804	-1910070	-3496310	1969780

# REACOES DE APOIO (daN e daN.mm)

\*\*\*\*\*

NO	FX	FY	FZ	MX	MY	MZ
1	936	-43	-19	33858	15601	4215290
4	-2	0	-4385	-0	6669600	-16
10	58	-258	8886	-16057800	129000	-131399
11	2	-0	-2931	-1	-11397200	-78
16	-996	303	-1553	-3496310	1910070	1969780

# TENSOES NOS ELEMENTOS (daN/mm2)

\*\*\*\*\*

ELEMENTO	SIGMA <sub>d</sub>	SIGMA <sub>e</sub>
1	4.53	1.05
2	2.45	3.47
3	1.49	1.37
4	7.26	7.18
5	1.06	1.99
6	E L E M E N T O	I N F L E X I V E L
7	2.50	3.34
8	8.62	8.96
9	1.82	17.26
10	7.41	7.23
11	5.09	2.73
12	6.30	6.70
13	3.07	2.20
14	4.44	2.90
15	2.19	4.78

# CARACTERISTICAS DAS CURVAS

\*\*\*\*\*

ELEMENTO	RAIO(mm)	ANGULO	TIPO	XX(mm)	YY(mm)	ZZ(mm)	FATOR FLEX.	FITIN	FITOUT
2	457	90	NORMAL	-6000	0	0	6.89	2.33	1.94
8	381	90	NORMAL	0	0	-5000	8.12	2.60	2.17
12	457	90	NORMAL	8000	0	0	6.89	2.33	1.94
14	457	90	NORMAL	8000	0	5000	6.89	2.33	1.94

## TENSOES INTENSIFICADAS NOS TES (daN/mm2)

\*\*\*\*\*

NO	TE	ELEMENTO	TENSAO	FITIN	FITOUT
5	1	4	12.76	1.59	1.78
5	1	5	1.71	1.73	1.97
5	1	10	13.14	1.59	1.78

TENSAO MAXIMA DE 17.26 daN/mm2 NO ELEMENTO 9

\*\*\*\*\*

## 5.5 - QUINTA APLICAÇÃO

Sistema de tubulação mostrado na figura (V.7) . Os nós estão numerados na figura (V.8) e as condições são idênticas às da quarta aplicação com exceção dos códigos dos apoios 4 e 11, que agora devem impedir o deslocamento vertical.

A análise dos resultados nos leva à conclusão que o sistema continua flexível.



# Listagem dos resultados da quinta aplicação

NUMERO DE NOS - 16  
NUMERO DE ELEMENTOS - 15  
NUMERO DE TIPOS DE TUBO - 2  
NUMERO DE NOS COM DIRECOES RESTRINGIDAS - 5  
NUMERO DE TES - 1  
MODULO DE ELASTICIDADE (daN/mm2) - 20000  
TEMPERATURA DE TRABALHO (graus C) - 200  
DILATACAO UNITARIA (1/graus C) - 1.2376E-05

## COORDENADAS DOS NOS (mm)

\*\*\*\*\*

NO	X	Y	Z
1	-6000	6000	0
2	-6000	457	0
3	-5543	0	0
4	-3000	0	0
5	0	0	0
6	0	0	-2000
7	0	0	-3000
8	0	0	-4619
9	0	381	-5000
10	0	2000	-5000
11	3000	0	0
12	7543	0	0
13	8000	0	457
14	8000	0	4543
15	8000	-457	5000
16	8000	-3000	5000

# MATRIZ DE INCIDENCIA

\*\*\*\*\*

ELEMENTO	INI	FIN	SECAO	TIPO
1	1	2	1	RET
2	2	3	1	CUR
3	3	4	1	RET
4	4	5	1	RET
5	5	6	2	RET
6	6	7	2	INF
7	7	8	2	RET
8	8	9	2	CUR
9	9	10	1	RET
10	5	11	1	RET
11	11	12	1	RET
12	12	13	1	CUR
13	13	14	1	RET
14	14	15	1	CUR
15	15	16	1	RET

## DESLOCAMENTOS PRESCRITOS NOS APOIOS RESTRINGIDOS (mm e rad)

\*\*\*\*\*

NO	DX	DY	DZ	TX	TY	TZ
1	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0

## CARACTERISTICAS GEOMETRICAS (mm)

\*\*\*\*\*

SECAO	DIAMETRO	ESPESSURA
1	324	12.7
2	273	9.27

## DESLOCAMENTOS DOS NOS (mm e rad)

\*\*\*\*\*

NO	DESLOC X	DESLOC Y	DESLOC Z	ROTACAO X	ROTACAO Y	ROTACAO Z
1	-0.00000	0.00000	-0.00000	0.00000	0.00000	-0.00000
2	-9.18004	-12.27080	0.04648	-0.00027	0.00028	-0.00081
3	-7.55019	-11.94430	0.21406	-0.00079	0.00011	0.00476
4	-1.89993	0.00002	0.00000	-0.00145	-0.00000	0.00325
5	4.76573	2.78542	3.88547	-0.00224	0.00013	-0.00055
6	3.35628	-1.93398	-0.44486	-0.00212	0.00113	-0.00016
7	2.21498	-4.00540	-2.66361	-0.00201	0.00115	-0.00014
8	0.38208	-5.62055	-6.16903	0.00027	0.00100	0.00018
9	0.10138	-3.60245	-5.27267	0.00472	0.00032	0.00007
10	-0.00002	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
11	11.43480	0.00002	0.00000	-0.00231	0.00000	-0.00080
12	21.53390	-1.49168	-8.61855	-0.00241	0.00175	-0.00026
13	21.89250	-0.67478	-7.59381	-0.00216	-0.00330	-0.00075
14	4.29283	6.59812	1.48005	-0.00107	-0.00420	-0.00177
15	2.11393	5.66147	2.29158	0.00111	-0.00245	-0.00120
16	0.00002	-0.00002	0.00000	0.00000	-0.00000	-0.00000

# ESFORÇOS NAS EXTREMIDADES DOS ELEMENTOS NO SISTEMA LOCAL (daN)

\*\*\*\*\*

ELEMENTO	FxD	FyD	FzD	FxE	FyE	FzE
1	3463	1439	144	-3463	-1439	-144
2	3466	1431	-144	-3466	-1431	144
3	1439	-3463	144	-1439	3463	-144
4	1439	1574	-5034	-1439	-1574	5034
5	9603	640	281	-9603	-640	-281
6	9602	642	286	-9602	-642	-286
7	9602	640	281	-9602	-640	-281
8	7242	6337	-282	-7242	-6337	282
9	640	-281	-9601	-640	281	9601
10	1158	934	4569	-1158	-934	-4569
11	1159	-345	1729	-1159	345	-1729
12	2042	-403	-344	-2042	403	344
13	1729	-345	-1158	-1729	345	1158
14	1472	978	-1158	-1472	-978	1158
15	342	1158	1729	-342	-1158	-1729

# MOMENTOS NAS EXTREMIDADES DOS ELEMENTOS NO SISTEMA LOCAL (daN.mm)

\*\*\*\*\*

ELEMENTO	MxD	MyD	MzD	MxE	MyE	MzE
1	116453	-252790	4426720	-116453	-542725	3548290
2	466110	-301421	3548290	-466110	394175	-2623270
3	608312	-50866	-2623370	-608312	-314097	-6182450
4	608317	7424810	6182450	-608317	7676770	-1459570
5	199051	-949131	555651	-199051	387674	723853
6	199054	-389968	-722802	-199054	104164	1364820
7	199052	-106261	-1363580	-199052	-348355	2398920
8	387315	-105457	2398840	-387315	257404	1015550
9	455635	-1015580	-91983	-455635	16560000	-362974
10	52523	-6727570	1658620	-52523	-6979490	1144230
11	52525	-5087560	-1144330	-52525	-2767200	-422151
12	335530	-261732	2767240	-335530	483756	-3027900
13	579673	3027990	105035	-579673	1705350	-1513680
14	1615720	-795901	1513020	-1615720	1544520	-880822
15	2234600	-881121	50258	-2234600	-3516170	2894760

# REACOES DE APOIO (daN e daN.mm)

\*\*\*\*\*

NO	FX	FY	FZ	MX	MY	MZ
1	1439	-3463	144	-252790	-116453	4426720
4	0	5037	-5177	5	7110710	-1
10	-281	-640	9601	-16560000	-455635	-362974
11	0	-1279	-2840	3	-12067000	-108
16	-1158	342	-1729	-3516170	2234600	2894760

# TENSOES NOS ELEMENTOS (daN/mm2)

\*\*\*\*\*

ELEMENTO	SIGMA <sub>d</sub>	SIGMA <sub>e</sub>
1	4.77	3.86
2	9.00	6.63
3	2.90	6.69
4	10.41	8.43
5	2.28	1.72
6	E L E M E N T O	I N F L E X I V E L
7	2.82	4.97
8	12.88	5.52
9	1.20	17.81
10	7.45	7.60
11	5.61	3.01
12	7.02	7.65
13	3.32	2.53
14	5.66	3.75
15	2.58	5.45

# CARACTERISTICAS DAS CURVAS

\*\*\*\*\*

ELEMENTO	RAIO (mm)	ANGULO	TIPO	XX (mm)	YY (mm)	ZZ (mm)	FATOR FLEX.	FITIN	FITOUT
2	457	90	NORMAL	-6000	0	0	6.89	2.33	1.94
8	381	90	NORMAL	0	0	-5000	8.12	2.60	2.17
12	457	90	NORMAL	8000	0	0	6.89	2.33	1.94
14	457	90	NORMAL	8000	0	5000	6.89	2.33	1.94

## TENSOES INTENSIFICADAS NOS TES (daN/mm2)

\*\*\*\*\*

NO	TE	ELEMENTO	TENSAO	FITIN	FITOUT
5	1	4	13.40	1.59	1.78
5	1	5	4.04	1.73	1.97
5	1	10	11.90	1.59	1.78

## TENSAO MAXIMA DE 17.81 daN/mm2 NO ELEMENTO 9

\*\*\*\*\*

## VI - ASPECTOS FINAIS

Nessa última parte do nosso trabalho iremos mostrar como programas que não fazem a separação de tensões primárias e secundárias podem ser utilizados para projeto de tubulação de acordo com a Norma ANSI B 31.3 .Também é comentado como se pode melhorar a flexibilidade de um sistema.

### 6.1 - DETERMINAÇÃO DAS TENSÕES SECUNDÁRIAS

Para determinação das tensões secundárias devemos desprezar todos os esforços que provocam tensões primárias, ou seja, devemos informar ao Programa que o peso da tubulação, assim como a pressão interna e outros esforços são nulos. Rodamos então o Programa com o módulo de elasticidade na temperatura ambiente e com os carregamentos temperatura e deslocamentos prescritos. Feito isso obtemos o valor das tensões no nosso sistema.

### 6.2 - DETERMINAÇÃO DAS TENSÕES PRIMÁRIAS

Para determinação das tensões primárias devemos fazer o cálculo desprezando os carregamentos temperatura e deslocamentos prescritos. Rodamos o Programa com o módulo de elasticidade a quente e retiramos o valor das tensões primárias no sistema.

### 6.3 - DETERMINAÇÃO DAS REAÇÕES DE APOIO

Para determinação dos esforços em qualquer ponto do sistema e reações de apoio devemos fazer o cálculo completo, com todos os carregamentos e com o módulo de elasticidade a quente. Feito isso retiramos o valor dos esforços para se comparar com valores admissíveis.

### 6.4 - COMO MELHORAR A FLEXIBILIDADE

Como já foi explicado anteriormente, não adianta aumentar a espessura do tubo para melhorar a flexibilidade. Além de mudar o tipo de material, o que geralmente não é feito, pode-se mudar a geometria da configuração ou o tipo e localização de restrições intermediárias para obtermos tensões efetivas menores em nosso sistema.



## APÊNDICE

### LISTAGEM DO PROGRAMA

## LISTAGEM DOS PROGRAMAS

```
10 REM *****
20 REM *** PROGRAMA A ***
30 REM *****
40 NA=3000:NP=180
50 PRINT '1,1' BLANK
60 PRINT '8,20' "PROGRAMA INTEGRANTE DE TESE DE MESTRADO"
70 PRINT '10,20' "    ENG. EURICO DIAS RODRIGUES"
80 PRINT '12,20' "    CALCULO DE TENSOES SECUNDARIAS"
90 PRINT '13,24' STRING$(30,42):PRINT '22,1' "PARA PROSEGUIR PRESSIONE QUALQUER TECLA"
100 A$=INKEY$:IF A$="" THEN 100
110 REM *** CHAMA DADOS ***
120 GOSUB 440
130 NDESL=NNO*NDESNO
140 IF NDESL>NP THEN PRINT "CAPACIDADE DO PROGRAMA FOI ULTRAPASSADA" ELSE 160
150 END
160 REM *** CHAMA PERFIL ***
170 GOSUB 1420
180 I1=1:NC=1
190 I2=I1+P(NDESL)
200 IF I2>(NA+1) THEN PRINT "DIMENSAO DO VETOR A NAO E SUFICIENTE" ELSE 220
210 END
220 NS=P(NDESL)
230 REM *** GRAVA DADOS NO DISCO ***
240 OPEN "O",1,"HELP1"
250 PRINT#1,CDT,TEMP,DU,NDESL,NNO,NDESNO,NC,NS,NUMTES,NNOELM,NDEELM,NUMELEM,NUMSERE,NUMNDR1
260 PRINT#1,NAUX1,E,G
270 PRINT#1,CHR$(34);NOMEESTR$;CHR$(34)
280 CLOSE 1
```

```

290 OPEN "O",1,"HELP2"
300 FOR K=1 TO NNO:PRINT#1,X(K),Y(K),Z(K):NEXT K
310 FOR K=1 TO NUMELEM:PRINT#1,XX(K),YY(K),ZZ(K):NEXT K
320 FOR K=1 TO NUMELEM:PRINT#1,CHR$(34);TIPOELEM$(K);CHR$(34);CHR$(34);CG$(K);CHR$(34):NEXT K
330 FOR K=1 TO NUMELEM:PRINT#1,RAIO(K),ANGULO(K),TIPOSECAO(K):NEXT K
340 FOR K=1 TO NUMELEM:FOR J=1 TO NNOELM:PRINT#1,NDN(K,J):NEXT J:NEXT K
350 FOR K=1 TO NUMSERE:PRINT#1,D(K),ESP(K),ZE(K),FC(K),AX(K),AR(K),IX(K),IY(K),IZ(K):NEXT K
360 FOR K=1 TO NUMTES:PRINT#1,CHR$(34);PLANOTE$(K);CHR$(34);NNOTE(K),CHR$(34);TES$(K);CHR$(34)
370 PRINT#1,FIN(K),FOUT(K):NEXT K
380 CLOSE 1
390 OPEN "O",1,"APONTA"
400 FOR I=1 TO NDESL:PRINT#1,P(I):NEXT I
410 CLOSE 1
420 REM *** MANDA RODAR PROG/BAS ***
430 RUN"PROG/BAS"
440 REM *****
450 REM *** SUBROTINA DADOS ***
460 REM *****
470 NDESNO=6:NNOELM=2:NDEELM=NNOELM*NDESNO
480 PRINT'1,1` BLANK:PRINT'1,10`"SUBROTINA PARA ENTRADA DE DADOS"
490 REM *** DADOS GERAIS ***
500 PRINT'3,1` "Nome da estrutura ";:INPUT NOMEESTR$
510 PRINT "Numero de elementos ";:INPUT NUMELEM
520 PRINT "Numero de nos ";:INPUT NNO
530 PRINT "Numero de tipos de secao reta ";:INPUT NUMSERE
540 PRINT "Numero de nos com direcoes restringidas ";:INPUT NUMNDRT
550 NAUX1=NUMNDRT*NDESNO
560 PRINT "Temperatura de projeto (graus C) ";:INPUT TEMP
570 PRINT "Dilatacao unitaria (1/graus C)";:INPUT DU:CDT=(TEMP-20)*DU
580 PRINT "Modulo de elasticidade (daN/mm2)";:INPUT E:G=E/2.6
590 PRINT "Numero de tes ";:INPUT NUMTES
600 GOSUB 1960
610 IF Z$="S" THEN 500
620 DIM NDN(NUMELEM,NNOELM),X(NNO),Y(NNO),Z(NNO),RAIO(NUMELEM),ANGULO(NUMELEM)
630 DIM XX(NUMELEM),YY(NUMELEM),ZZ(NUMELEM),REC(NUMNDRT,NDESNO),NTC(NUMNDRT),NNR(NUMNDRT)
640 DIM NZ(NUMNDRT,3),CG$(NUMELEM),TIPOELEM$(NUMELEM),TIPOSECAO(NUMELEM)

```

```

650 REM *** MATRIZ DE INCIDENCIA ***
660 FOR K=1 TO NUMELEM:PRINT '1,1' BLANK
670 PRINT "ELEMENTO NUMERO ";K
680 GOSUB 1620
690 INPUT '4,35' NDN(K,1)
700 INPUT '5,33' NDN(K,2)
710 INPUT '6,19' TIPOELEM$(K)
720 INPUT '7,21' TIPOSECAO(K)
730 IF TIPOELEM$(K)="CUR" THEN GOSUB 1180
740 GOSUB 1960
750 IF Z$="S" THEN 680
760 NEXT K
770 REM *** COORDENADAS DOS NOS ***
780 FOR K=1 TO NNO:PRINT '1,1' BLANK
790 PRINT "NO NUMERO ";K
800 GOSUB 1830
810 INPUT '4,20' X(K)
820 INPUT '5,20' Y(K)
830 INPUT '6,20' Z(K)
840 GOSUB 1960
850 IF Z$="S" THEN 810
860 NEXT K
870 REM *** CARACTERISTICAS DAS SECOES ***
880 FOR K= 1 TO NUMSERE:PRINT '1,1' BLANK
890 PRINT "SECAO NUMERO ";K
900 GOSUB 1680
910 INPUT '7,24' D(K)
920 INPUT '9,25' ESP(K)
930 GOSUB 1960
940 IF Z$="S" THEN 910
950 GOSUB 1880
960 NEXT K

```

```

970 REM *** APOIOS RESTRINGIDOS ***
980 OPEN "O",1,"REC":FOR I= 1 TO NUMNDRT:PRINT '1,1' BLANK
990 PRINT "NO RESTRITO NUMERO ";I
1000 GOSUB 1720
1010 INPUT '4,39' NNR(I)
1020 INPUT '5,18' NTC(I)
1030 INPUT '6,15' REC(I,1)
1040 INPUT '7,15' REC(I,2)
1050 INPUT '8,15' REC(I,3)
1060 INPUT '9,15' REC(I,4)
1070 INPUT '10,15' REC(I,5)
1080 INPUT '11,15' REC(I,6)
1090 GOSUB 1960
1100 IF Z$="S" THEN 1010
1110 FOR K=1 TO 6:PRINT#1,REC(I,K):NEXT K
1120 PRINT#1,NNR(I),NTC(I)
1130 NEXT I
1140 CLOSE 1
1150 REM *** CARACTERISTICAS DOS TES ***
1160 IF NUMTES <> 0 THEN GOSUB 1270
1170 RETURN
1180 REM *** SUBROTINA PARA ENTRADA DE DADOS DE CURVAS ***
1190 PRINT '9,1' "Raio da curva (mm) ";:INPUT RAIO(K)
1200 PRINT "Angulo da curva (graus) ";:INPUT ANGULO(K):ANGULO(K)=ANGULO(K)*3.14159/180
1210 PRINT "Coordenada X da intersecao entre tangentes (mm) ";:INPUT XX(K)
1220 PRINT "Coordenada Y da intersecao entre tangentes (mm) ";:INPUT YY(K)
1230 PRINT "Coordenada Z da intersecao entre tangentes (mm) ";:INPUT ZZ(K)
1240 PRINT '14,1' "Trata-se de curva em gomos (S-N)";:INPUT CG$(K)
1250 RETURN

```

```

1260 REM *** SUBROTINA PARA ENTRADA DE DADOS DE TES ***
1270 FOR K=1 TO NUMTES:PRINT '1,1' BLANK
1280 PRINT "TE NUMERO ";K
1290 PRINT '4,1' "Numero do no do te ";:INPUT NNOTE(K)
1300 PRINT "Plano do te no sistema global (XY,XZ,YZ ou QQ) ";:INPUT PLANOTE$(K)
1310 PRINT "Trata-se de te forjado fabricado de acordo c/ ANSI.B.16.9 (S-N) ";:INPUT TE$(K)
1320 IF TE$(K)="S" THEN 1350
1330 PRINT "Fator de intensificacao de tensoes no plano do te numero ";K;:INPUT FIN(K)
1340 PRINT "Fator de intensificacao de tensoes fora do plano do te numero ";K;:INPUT FOUT(K)
1350 GOSUB 1960
1360 IF Z$="S" THEN 1290
1370 NEXT K
1380 RETURN
1390 REM *****
1400 REM *** SUBROTINA PERFIL ***
1410 REM *****
1420 PRINT '1,1' BLANK:PRINT "ESTOU GERANDO O VETOR APONTADOR"
1430 DIM P(NDESL)
1440 FOR K=1 TO NDESL:P(K)=0:NEXT K
1450 FOR I=1 TO NUMELEM:NDI=1
1460 FOR J=2 TO NNOELM
1470 IF NDN(I,J)<NDN(I,NDI) THEN NDI=J
1480 NEXT J
1490 L=NDESNO*(NDN(I,NDI)-1)+1
1500 FOR J=1 TO NNOELM
1510 FOR K=1 TO NDESNO
1520 M=NDESNO*(NDN(I,J)-1)+K
1530 IDIF=M-L+1
1540 IF P(M)<IDIF THEN P(M)=IDIF
1550 NEXT K
1560 NEXT J
1570 NEXT I
1580 FOR I=2 TO NDESL
1590 P(I)=P(I-1)+P(I)
1600 NEXT I
1610 RETURN

```

```
1620 REM *** SUBROTINA MASCARA PARA MATRIZ DE INCIDENCIA ***
1630 PRINT '4,1' "Numero do no inicial do elemento"
1640 PRINT "Numero do no final do elemento"
1650 PRINT "Tipo do elemento"
1660 PRINT "Tipo de secao reta"
1670 RETURN
1680 REM *** SUBROTINA MASCARA PARA DADOS DE CURVAS ***
1690 PRINT '7,1' "Diametro externo (mm)"
1700 PRINT '9,1' "Espessura nominal (mm)"
1710 RETURN
1720 REM *** SUBROTINA MASCARA PARA APOIOS RESTRINGIDOS ***
1730 PRINT "LEMBRAR QUE SO PODE HAVER DESLOCAMENTO PRESCRITO EM DIRECAO COM CODIGO 1"
1740 PRINT '4,1' "Numero do no com direcao restringida"
1750 PRINT '5,1' "Codigo do apoio"
1760 PRINT '6,1' "Delta X (mm)"
1770 PRINT "Delta Y (mm)"
1780 PRINT "Delta Z (mm)"
1790 PRINT "Teta X (rad)"
1800 PRINT "Teta Y (rad)"
1810 PRINT "Teta Z (rad)"
1820 RETURN
```

```

1830 REM *** SUBROTINA MASCARA PARA COORDENADAS DOS NOS ***
1840 PRINT '4,1' "Coordenada X (mm)"
1850 PRINT "Coordenada Y (mm)"
1860 PRINT "Coordenada Z (mm)"
1870 RETURN
1880 REM *** SUBROTINA QUE CALCULA PROPRIEDADES GEOMETRICAS ***
1890 IX(K)=.0490874*(D(K)^4-(D(K)-2*ESP(K))^4)
1900 IY(K)=IX(K):IZ(K)=IX(K)*2
1910 ZE(K)=IX(K)*2/D(K)
1920 AX(K)=3.14159*ESP(K)*(D(K)-ESP(K))
1930 FC(K)=4*((D(K)/2)^3-(D(K)/2-ESP(K))^3)/(3*((D(K)/2)^2+(D(K)/2-ESP(K))^2)*ESP(K))
1940 AR(K)=AX(K)/FC(K)
1950 RETURN
1960 REM *** SUBROTINA PARA ALTERACAO DE DADOS ***
1970 Z$="A":PRINT '20,1' "Deseja alterar algum dado acima ? (S-N)"
1980 A$=INKEY$:IF A$="" THEN 1980
1990 IF A$="N" THEN 2010
2000 IF A$ <> "S" THEN 1980 ELSE Z$="S"
2010 RETURN

```



```

10 REM *****
20 REM *** PROGRAMA B ***
30 REM *****
40 REM *** LEITURA DE DADOS ***
50 OPEN "I",1,"HELP1"
60 INPUT#1,CDT,TEMP,DU,NDESL,NNO,NDESNO,NC,NS,NUMTES,NNOELM,NDEELM,NUMELEM,NUMSERE,NUMNDRT
70 INPUT#1,NAUX1,E,G,NOMEESTR$
80 CLOSE 1
90 DIM NDN(NUMELEM,NNOELM),RAIO(NUMELEM),ANGULO(NUMELEM),CG$(NUMELEM),TIPOELEM$(NUMELEM)
100 DIM TIPOSECAO(NUMELEM),NNR(NUMNDRT),NTC(NUMNDRT),FP(NUMELEM)
110 DIM NZ(NUMNDRT,3),P(NDESL),X(NNO),Y(NNO),Z(NNO),XX(NUMELEM),YY(NUMELEM),ZZ(NUMELEM)
120 OPEN "I",1,"APONTA"
130 FOR I=1 TO NDESL:INPUT#1,P(I):NEXT I
140 CLOSE 1
150 OPEN "I",1,"HELP2"
160 FOR K=1 TO NNO:INPUT#1,X(K),Y(K),Z(K):NEXT K
170 FOR K=1 TO NUMELEM:INPUT#1,XX(K),YY(K),ZZ(K):NEXT K
180 FOR K=1 TO NUMELEM:INPUT#1,TIPOELEM$(K),CG$(K):NEXT K
190 FOR K=1 TO NUMELEM:INPUT#1,RAIO(K),ANGULO(K),TIPOSECAO(K):NEXT K
200 FOR K=1 TO NUMELEM:FOR J=1 TO NNOELM:INPUT#1,NDN(K,J):NEXT J:NEXT K
210 FOR K=1 TO NUMSERE:INPUT#1,D(K),ESP(K),ZE(K),FC(K),AX(K),AR(K),IX(K),IY(K),IZ(K):NEXT K
220 FOR K=1 TO NUMTES:INPUT#1,PLANOTE$(K),NNOTE(K),TES(K),FIN(K),FOUT(K):NEXT K
230 CLOSE 1
240 REM *** CHAMA FORMS ***
250 GOSUB 370
260 REM *** GRAVA MATRIZ DE ROTACAO ***
270 OPEN "O",1,"ROTA"
280 FOR M=1 TO NS:PRINT#1,A(M):NEXT M
290 FOR I=1 TO NUMELEM
300 FOR J=1 TO 3
310 FOR K=1 TO 3
320 PRINT#1,R(I,J,K)
330 NEXT K:NEXT J:NEXT I
340 CLOSE 1
350 REM *** MANDA RODAR PROGCBAS ***
360 RUN"PROGCBAS"

```

```

370 REM *****
380 REM *** SUBROTINA FORMS ***
390 REM *****
400 OPEN "O",1,"SMR"
410 DIM A(NS),SMD(12,12),JK(12),SM(12,12),SMR(12,12),L(NUMELEM),R(NUMELEM,3,3),FM(6,6)
420 FOR K=1 TO NS: A(K)=0:NEXT K
430 FOR I=1 TO NUMELEM
440 PRINT "ESTOU GERANDO A MATRIZ DE RIGIDEZ PARA O ELEMENTO ":I
450 FOR J=1 TO 3:FOR K=1 TO 3:R(I,J,K)=0:NEXT K:NEXT J
460 CX(1)=X(NDN(I,2))-X(NDN(I,1))
470 CX(2)=Y(NDN(I,2))-Y(NDN(I,1))
480 CX(3)=Z(NDN(I,2))-Z(NDN(I,1))
490 FOR J=1 TO NDEELM:FOR K=1 TO NDEELM:SM(J,K)=0:NEXT K:NEXT J
500 L(I)=SQR(CX(1)^2+CX(2)^2+CX(3)^2)
510 FOR M=1 TO 3
520 R(I,1,M)=CX(M)/L(I)
530 NEXT M
540 IF TIPOELEM$(I)="CUR" THEN GOSUB 1630 ELSE 560
550 GOTO 860
560 PROB=.001
570 IF R(I,1,1)+PROB < 1 THEN 590
580 R(I,2,2)=1:R(I,3,3)=1:GOTO 860
590 IF R(I,1,1)-PROB > -1 THEN 610
600 R(I,2,2)=1:R(I,3,3)=-1:GOTO 860
610 IF R(I,1,2)+PROB < 1 THEN 630
620 R(I,3,3)=1:R(I,2,1)=-1:GOTO 860
630 IF R(I,1,2)-PROB > -1 THEN 650
640 R(I,3,3)=1:R(I,2,1)=1:GOTO 860
650 IF R(I,1,3)+PROB < 1 THEN 670
660 R(I,2,2)=1:R(I,3,1)=-1:GOTO 860
670 IF R(I,1,3)-PROB > -1 THEN 690
680 R(I,2,2)=1:R(I,3,1)= 1:GOTO 860
690 REM *
700 DD=-(R(I,1,1)*X(NDN(I,1))+R(I,1,2)*Y(NDN(I,1))+R(I,1,3)*Z(NDN(I,1)))
710 XX(I)=X(NDN(I,1))+10:YY(I)=Y(NDN(I,1))+10:ZZ(I)=Z(NDN(I,1))+10
720 IF R(I,1,3)=0 THEN 750
730 ZZ(I)=(-R(I,1,1)*XX(I)-R(I,1,2)*YY(I)-DD)/R(I,1,3)
740 GOTO 760

```

```

750 YY(I)=(-R(I,1,1)*XX(I)-R(I,1,3)*ZZ(I)-DD)/R(I,1,2)
760 CY(1)=XX(I)-X(NDN(I,1))
770 CY(2)=YY(I)-Y(NDN(I,1))
780 CY(3)=ZZ(I)-Z(NDN(I,1))
790 LY=SQR(CY(1)^2+CY(2)^2+CY(3)^2)
800 FOR M=1 TO 3
810 R(I,2,M)=CY(M)/LY
820 NEXT M
830 R(I,3,1)=R(I,1,2)*R(I,2,3)-R(I,1,3)*R(I,2,2)
840 R(I,3,2)=R(I,1,3)*R(I,2,1)-R(I,1,1)*R(I,2,3)
850 R(I,3,3)=R(I,1,1)*R(I,2,2)-R(I,1,2)*R(I,2,1)
860 REM *
870 IF TIPOELEM$(I)="RET" THEN GOSUB 1780:GOTO 930
880 IF TIPOELEM$(I)="CUR" THEN GOSUB 2080:GOTO 930
890 IF TIPOELEM$(I)="INF" THEN GOSUB 3030:GOTO 930
900 PRINT '1,1' BLANK:PRINT '10,10' "TIPO DE ELEMENTO NAO EXISTENTE NO PROGRAMA"
910 PRINT "ENTRAR NOVAMENTE COM O TIPO DO ELEMENTO ";I
920 INPUT "TIPO DO ELEMENTO ";TIPOELEM$(I):GOTO 870
930 FOR J=1 TO NDEELM:FOR K=1 TO J:SM(K,J)=SM(J,K):NEXT K:NEXT J
940 REM *
950 REM *
960 REM *
970 FOR J=1 TO NDEELM
980 FOR K=1 TO NDEELM
990 SMR(J,K)=0
1000 NEXT K:NEXT J
1010 FOR IS=1 TO 3
1020 FOR JJ=1 TO 3
1030 FOR KK=1 TO 3
1040 SMR(IS,JJ)=SMR(IS,JJ)+SM(IS,KK)*R(I,KK,JJ)
1050 SMR(IS+3,JJ)=SMR(IS+3,JJ)+SM(IS+3,KK)*R(I,KK,JJ)
1060 SMR(IS,JJ+3)=SMR(IS,JJ+3)+SM(IS,KK+3)*R(I,KK,JJ)
1070 SMR(IS+3,JJ+3)=SMR(IS+3,JJ+3)+SM(IS+3,KK+3)*R(I,KK,JJ)
1080 SMR(IS,JJ+6)=SMR(IS,JJ+6)+SM(IS,KK+6)*R(I,KK,JJ)
1090 SMR(IS,JJ+9)=SMR(IS,JJ+9)+SM(IS,KK+9)*R(I,KK,JJ)
1100 SMR(IS+6,JJ)=SMR(IS+6,JJ)+SM(IS+6,KK)*R(I,KK,JJ)

```

```

1110 SMR(IS+9,JJ)=SMR(IS+9,JJ)+SM(IS+9,KK)*R(I,KK,JJ)
1120 SMR(IS+3,JJ+6)=SMR(IS+3,JJ+6)+SM(IS+3,KK+6)*R(I,KK,JJ)
1130 SMR(IS+3,JJ+9)=SMR(IS+3,JJ+9)+SM(IS+3,KK+9)*R(I,KK,JJ)
1140 SMR(IS+6,JJ+3)=SMR(IS+6,JJ+3)+SM(IS+6,KK+3)*R(I,KK,JJ)
1150 SMR(IS+6,JJ+6)=SMR(IS+6,JJ+6)+SM(IS+6,KK+6)*R(I,KK,JJ)
1160 SMR(IS+6,JJ+9)=SMR(IS+6,JJ+9)+SM(IS+6,KK+9)*R(I,KK,JJ)
1170 SMR(IS+9,JJ+3)=SMR(IS+9,JJ+3)+SM(IS+9,KK+3)*R(I,KK,JJ)
1180 SMR(IS+9,JJ+6)=SMR(IS+9,JJ+6)+SM(IS+9,KK+6)*R(I,KK,JJ)
1190 SMR(IS+9,JJ+9)=SMR(IS+9,JJ+9)+SM(IS+9,KK+9)*R(I,KK,JJ)
1200 NEXT KK:NEXT JJ:NEXT IS
1210 FOR KK=1 TO NDEELM
1220 FOR JJ=1 TO NDEELM
1230 PRINT#1,SMR(JJ,KK)
1240 NEXT JJ:NEXT KK
1250 FOR JJ=1 TO NDEELM:FOR KK=1 TO NDEELM:SMD(JJ,KK)=0:NEXT KK:NEXT JJ
1260 FOR IS=1 TO 3
1270 FOR JJ=1 TO 3
1280 FOR KK=1 TO 3
1290 SMD(IS,JJ)=SMD(IS,JJ)+R(I,KK,IS)*SMR(KK,JJ)
1300 SMD(IS+3,JJ)=SMD(IS+3,JJ)+R(I,KK,IS)*SMR(KK+3,JJ)
1310 SMD(IS,JJ+3)=SMD(IS,JJ+3)+R(I,KK,IS)*SMR(KK,JJ+3)
1320 SMD(IS+3,JJ+3)=SMD(IS+3,JJ+3)+R(I,KK,IS)*SMR(KK+3,JJ+3)
1330 SMD(IS,JJ+6)=SMD(IS,JJ+6)+R(I,KK,IS)*SMR(KK,JJ+6)
1340 SMD(IS,JJ+9)=SMD(IS,JJ+9)+R(I,KK,IS)*SMR(KK,JJ+9)
1350 SMD(IS+6,JJ)=SMD(IS+6,JJ)+R(I,KK,IS)*SMR(KK+6,JJ)
1360 SMD(IS+9,JJ)=SMD(IS+9,JJ)+R(I,KK,IS)*SMR(KK+9,JJ)
1370 SMD(IS+3,JJ+6)=SMD(IS+3,JJ+6)+R(I,KK,IS)*SMR(KK+3,JJ+6)
1380 SMD(IS+3,JJ+9)=SMD(IS+3,JJ+9)+R(I,KK,IS)*SMR(KK+3,JJ+9)
1390 SMD(IS+6,JJ+3)=SMD(IS+6,JJ+3)+R(I,KK,IS)*SMR(KK+6,JJ+3)
1400 SMD(IS+6,JJ+6)=SMD(IS+6,JJ+6)+R(I,KK,IS)*SMR(KK+6,JJ+6)
1410 SMD(IS+6,JJ+9)=SMD(IS+6,JJ+9)+R(I,KK,IS)*SMR(KK+6,JJ+9)
1420 SMD(IS+9,JJ+3)=SMD(IS+9,JJ+3)+R(I,KK,IS)*SMR(KK+9,JJ+3)
1430 SMD(IS+9,JJ+6)=SMD(IS+9,JJ+6)+R(I,KK,IS)*SMR(KK+9,JJ+6)
1440 SMD(IS+9,JJ+9)=SMD(IS+9,JJ+9)+R(I,KK,IS)*SMR(KK+9,JJ+9)
1450 NEXT KK:NEXT JJ:NEXT IS

```

```

1460 IC=0
1470 FOR J=1 TO NNOELM
1480 FOR K=1 TO NDESNO
1490 IC=IC+1
1500 M=NDESNO*(NDN(I,J)-1)+K
1510 JK(IC)=M
1520 NEXT K:NEXT J
1530 FOR J=1 TO NDEELM
1540 FOR K=1 TO NDEELM
1550 IF JK(K)<JK(J) THEN 1580
1560 N=P(JK(K))+JK(J)-JK(K)
1570 A(N)=A(N)+SMD(J,K)
1580 NEXT K
1590 NEXT J
1600 NEXT I
1610 CLOSE 1
1620 RETURN
1630 REM *** SUBROTINA PARA CALCULAR COSSENOS DIRETORES y e z DE CURVAS ***
1640 REM *** DIRECAO y ***
1650 CY(1)=XX(I)-((X(NDN(I,2))+X(NDN(I,1)))/2)
1660 CY(2)=YY(I)-((Y(NDN(I,2))+Y(NDN(I,1)))/2)
1670 CY(3)=ZZ(I)-((Z(NDN(I,2))+Z(NDN(I,1)))/2)
1680 LY=SQR(CY(1)^2+CY(2)^2+CY(3)^2)
1690 FOR M=1 TO 3
1700 R(I,2,M)=CY(M)/LY
1710 NEXT M
1720 REM *** DIRECAO z ***
1730 REM *** OBTIDO PELO PRODUTO VETORIAL DOS COSSENOS DIRETORES DAS DIRECOES x E y ***
1740 R(I,3,1)=R(I,1,2)*R(I,2,3)-R(I,1,3)*R(I,2,2)
1750 R(I,3,2)=R(I,1,3)*R(I,2,1)-R(I,1,1)*R(I,2,3)
1760 R(I,3,3)=R(I,1,1)*R(I,2,2)-R(I,1,2)*R(I,2,1)
1770 RETURN

```

```

1780 REM *** SUBROTINA PARA GERAR A MATRIZ DE RIGIDEZ DE ELEMENTO RETO ***
1790 K=TIPOSECAO(I)
1800 GG=6*FC(K)*E*IX(K)/(G*AX(K)*L(I)^2)
1810 SM(1,1)=E*AX(K)/L(I)
1820 SM(7,1)=-SM(1,1)
1830 SM(2,2)=E*IX(K)*12/(L(I)^3*(1+2*GG))
1840 SM(8,2)=-SM(2,2)
1850 SM(6,2)=E*IX(K)*6/(L(I)^2*(1+2*GG))
1860 SM(12,2)=SM(6,2)
1870 SM(3,3)=SM(2,2)
1880 SM(5,3)=-SM(6,2)
1890 SM(9,3)=SM(8,2)
1900 SM(11,3)=SM(5,3)
1910 SM(4,4)=G*IZ(K)/L(I)
1920 SM(10,4)=-SM(4,4)
1930 SM(5,5)=E*IX(K)*4*(1+GG/Z)/(L(I)*(1+2*GG))
1940 SM(9,5)=SM(6,2)
1950 SM(11,5)=E*IX(K)*2*(1-GG)/(L(I)*(1+2*GG))
1960 SM(6,6)=SM(5,5)
1970 SM(8,6)=SM(5,3)
1980 SM(12,6)=SM(11,5)
1990 SM(7,7)=SM(1,1)
2000 SM(8,8)=SM(2,2)
2010 SM(12,8)=SM(8,6)
2020 SM(9,9)=SM(8,8)
2030 SM(11,9)=SM(6,2)
2040 SM(10,10)=SM(4,4)
2050 SM(11,11)=SM(6,6)
2060 SM(12,12)=SM(6,6)
2070 RETURN

```

```

2080 REM *** SUBROTINA PARA GERAR A MATRIZ DE RIGIDEZ DE ELEMENTO CURVO ***
2090 FOR KX=1 TO 6:FOR KY=1 TO 6:FM(KX,KY)=0:NEXT KY:NEXT KX
2100 K=TIPOSECAO(I)
2110 FI=ANGULO(I):SF=SIN(FI)
2120 SF2=SIN(FI/2)
2130 CF=COS(FI):CF2=COS(FI/2)
2140 S1=FI+SF:S2=FI-SF:R=RAIO(I):FP(I)=1.65*((D(K)-ESP(K))/2)^2/(ESP(K)*R)
2150 IF CG$(I)<>"S" THEN 2170
2160 PRINT "Fator de flexibilidade curva numero ";I;:INPUT FP(I)
2170 FP=FP(I):II=2*E*IX(K):IJ=2*G*IZ(K)
2180 FM(1,1)=(R*S1)/(2*E*AX(K))+(R*S2)/(2*G*AR(K))+(FP*R^3*(FI-3*SF+2*FI*CF2^2))/II
2190 FM(1,2)=(FP*R^3*(4*SF2^2-FI*SF))/II
2200 FM(1,6)=(FP*R^2*(4*SF2-2*FI*CF2))/II
2210 FM(2,2)=R*S2/(2*E*AX(K))+R*S1/(2*G*AR(K))+FP*R^3*(S2+2*FI*SF2^2)/II
2220 FM(2,6)=FP*R^2*FI*SF2/(E*IX(K))
2230 FM(6,6)=FP*R*FI/(E*IX(K))
2240 FM(3,3)=R^3*(3*FI+SF*CF-4*SF)/IJ+FP*R^3*(FI-SF*CF)/II+R*FI/(G*AR(K))
2250 FM(3,4)=-R^2*(4*SF2-CF2*S1)/IJ+FP*R^2*CF2*S2/II
2260 FM(3,5)=-R^2*SF2*S2/IJ-FP*R^2*SF2*S1/II
2270 FM(4,4)=R*S1/IJ+FP*R*S2/II
2280 FM(5,5)=R*S2/IJ+FP*R*S1/II
2290 FM(2,1)=FM(1,2)
2300 FM(6,1)=FM(1,6)
2310 FM(6,2)=FM(2,6)
2320 FM(4,3)=FM(3,4)
2330 FM(5,3)=FM(3,5)
2340 N=6
2350 NN=N-1
2360 FM(1,1)=1/FM(1,1)
2370 FOR M=1 TO NN
2380 K=M+1
2390 FOR II=1 TO M
2400 G(II)=0
2410 FOR J=1 TO M
2420 G(II)=G(II)+FM(II,J)*FM(J,K)
2430 NEXT J:NEXT II

```

```
2440 D=0
2450 FOR II=1 TO M
2460 D=D+FM(K,II)*G(II)
2470 NEXT II
2480 EE=FM(K,K)-D
2490 FM(K,K)=1/EE
2500 FOR II=1 TO M
2510 FM(II,K)=-G(II)*FM(K,K)
2520 NEXT II
2530 FOR J=1 TO M
2540 H(J)=0
2550 FOR II=1 TO M
2560 H(J)=H(J)+FM(K,II)*FM(II,J)
2570 NEXT II:NEXT J
2580 FOR J=1 TO M
2590 FM(K,J)=-H(J)*FM(K,K)
2600 NEXT J
2610 FOR II=1 TO M
2620 FOR J=1 TO M
2630 FM(II,J)=FM(II,J)-G(II)*FM(K,J)
2640 NEXT J:NEXT II
2650 NEXT M
2660 FOR J=7 TO 12
2670 JT=J-6
2680 FOR K=7 TO J
2690 KT=K-6
2700 SM(J,K)=FM(JT,KT)
2710 NEXT K:NEXT J
```



```

2720 SM(1,1)=SM(7,7)
2730 SM(2,1)=SM(8,7)
2740 SM(2,2)=SM(8,8)
2750 SM(3,3)=SM(9,9)
2760 SM(4,3)=SM(10,9)
2770 SM(4,4)=SM(10,10)
2780 SM(5,3)=SM(11,9)-SM(9,9)*L(I)
2790 SM(5,4)=SM(11,10)-SM(10,9)*L(I)
2800 SM(5,5)=SM(11,11)-2*SM(11,9)*L(I)+SM(9,9)*L(I)^2
2810 SM(6,1)=SM(8,7)*L(I)+SM(12,7)
2820 SM(6,2)=SM(12,8)+SM(8,8)*L(I)
2830 SM(6,6)=SM(12,12)+SM(8,8)*L(I)^2+2*SM(12,8)*L(I)
2840 SM(7,1)=-SM(7,7)
2850 SM(7,2)=-SM(8,7)
2860 SM(7,6)=- (SM(8,7)*L(I)+SM(12,7))
2870 SM(8,1)=-SM(8,7)
2880 SM(8,2)=-SM(8,8)
2890 SM(8,6)=- (SM(8,8)*L(I)+SM(12,8))
2900 SM(9,3)=-SM(9,9)
2910 SM(9,4)=-SM(10,9)
2920 SM(9,5)=-SM(11,9)+SM(9,9)*L(I)
2930 SM(10,3)=-SM(10,9)
2940 SM(10,4)=-SM(10,10)
2950 SM(10,5)=-SM(11,10)+SM(10,9)*L(I)
2960 SM(11,3)=-SM(11,9)
2970 SM(11,4)=-SM(11,10)
2980 SM(11,5)=-SM(11,11)+SM(11,9)*L(I)
2990 SM(12,1)=-SM(12,7)
3000 SM(12,2)=-SM(12,8)
3010 SM(12,6)=- (SM(12,8)*L(I)+SM(12,12))
3020 RETURN

```

```

3030 REM *** SUBROTINA PARA GERAR A MATRIZ DE RIGIDEZ DE ELEMENTO INFLEXIVEL ***
3040 K=TIPOSECAO(I)
3050 DAUX=D(K)
3060 ESPAUX=ESP(K)
3070 D(K)=D(K)+6*ESP(K)
3080 ESP(K)=6*ESP(K)
3090 GOSUB 3140
3100 GOSUB 1780
3110 D(K)=DAUX:ESP(K)=ESPAUX
3120 GOSUB 3140
3130 RETURN
3140 REM *** SUBROTINA QUE CALCULA PROPRIEDADES GEOMETRICAS ***
3150 IX(K)=.0490874*(D(K)^4-(D(K)-2*ESP(K))^4)
3160 IY(K)=IX(K):IZ(K)=IX(K)*2
3170 ZE(K)=IX(K)*2/D(K)
3180 AX(K)=3.14159*ESP(K)*(D(K)-ESP(K))
3190 FC(K)=4*((D(K)/2)^3-(D(K)/2-ESP(K))^3)/(3*((D(K)/2)^2+(D(K)/2-ESP(K))^2)*ESP(K))
3200 AR(K)=AX(K)/FC(K)
3210 RETURN

```

```

10 REM *****
20 REM *** PROGRAMA C ***
30 REM *****
40 REM *** LEITURA DE DADOS ***
50 OPEN "I",1,"HELP1"
60 INPUT#1,CDT,TEMP,DU,NDESL,NNO,NDESNO,NC,NS,NUMTES,NNOELM,NDEELM,NUMELEM,NUMSERE,NUMNDRT
70 INPUT#1,NAUX1,E,G,NOMEESTR$
80 CLOSE 1
90 DIM F(NDESL,NC),NDN(NUMELEM,NNOELM),RAIO(NUMELEM),ANGULO(NUMELEM),CG$(NUMELEM)
100 DIM A(NS),R(NUMELEM,3,3),TIPOELEM$(NUMELEM),TIPOSECAO(NUMELEM),NNR(NUMNDRT)
110 DIM NTC(NUMNDRT),FP(NUMELEM)
120 DIM NZ(NUMNDRT,3),P(NDESL),X(NNO),Y(NNO),Z(NNO),XX(NUMELEM),YY(NUMELEM),ZZ(NUMELEM)
130 OPEN "I",1,"APONTA"
140 FOR I=1 TO NDESL:INPUT#1,P(I):NEXT I
150 CLOSE 1
160 OPEN "I",1,"HELP2"
170 FOR K=1 TO NNO:INPUT#1,X(K),Y(K),Z(K):NEXT K
180 FOR K=1 TO NUMELEM:INPUT#1,XX(K),YY(K),ZZ(K):NEXT K
190 FOR K=1 TO NUMELEM:INPUT#1,TIPOELEM$(K),CG$(K):NEXT K
200 FOR K=1 TO NUMELEM:INPUT#1,RAIO(K),ANGULO(K),TIPOSECAO(K):NEXT K
210 FOR K=1 TO NUMELEM:FOR J=1 TO NNOELM:INPUT#1,NDN(K,J):NEXT J:NEXT K
220 FOR K=1 TO NUMSERE:INPUT#1,D(K),ESP(K),ZE(K),FC(K),AX(K),AR(K),IX(K),IY(K),IZ(K):NEXT K
230 FOR K=1 TO NUMTES:INPUT#1,PLANOTE$(K),NNOTE(K),TE$(K),FIN(K),FOUT(K):NEXT K
240 CLOSE 1
250 OPEN "I",1,"REC"
260 FOR I=1 TO NUMNDRT
270 FOR K=1 TO 6
280 INPUT#1,REC(I,K)
290 NEXT K
300 INPUT#1,NNR(I),NTC(I)
310 NEXT I
320 CLOSE 1

```

```

330 OPEN "I",1,"ROTA"
340 FOR M=1 TO NS:INPUT#1,A(M):NEXT M
350 FOR I=1 TO NUMELEM:FOR J=1 TO 3
360 FOR K=1 TO 3
370 INPUT#1,R(I,J,K)
380 NEXT K:NEXT J:NEXT I
390 CLOSE 1
400 REM *** CHAMA FORMF ***
410 GOSUB 580
420 REM *** CHAMA APOIO ***
430 GOSUB 780
440 REM *** CHAMA RESOL ***
450 GOSUB 1020
460 REM *** GRAVA DADOS NO DISCO ***
470 OPEN "O",1,"HELP3"
480 FOR I=1 TO NUMELEM:PRINT#1,FP(1):NEXT I
490 FOR I=1 TO NDESL:FOR J=1 TO NC:PRINT#1,F(I,J):NEXT J:NEXT I
500 FOR I=1 TO NUMELEM:FOR J=1 TO 3:FOR K=1 TO 3:PRINT#1,R(I,J,K):NEXT K:NEXT J:NEXT I
510 CLOSE 1
520 REM *** MANDA RODAR PROG/BAS ***
530 PRINT "A IMPRESSORA ESTA PREPARADA ? (S-N)"
540 IP$=INKEY$:IF IP$="" THEN 540
550 IF IP$="N" THEN END
560 IF IP$ <> "S" THEN 540
570 RUN"PROG/BAS"
580 REM *****
590 REM *** SUBROTINA FORMF ***
600 REM *****
610 PRINT "ESTOU SIMULANDO O CARREGAMENTO DELTA T ***
620 NZ(1,1)=X(NNR(1)):NZ(1,2)=Y(NNR(1)):NZ(1,3)=Z(NNR(1))
630 FOR J=2 TO NUMNDR
640 NX=10^(NDESNO-1):NTC=NTC(J)
650 FOR JJ=1 TO 3
660 IDA=NTC/NX

```

```

670 IF IDA<.8 THEN 710
680 NZ(J,1)=X(NNR(J)):NZ(J,2)=Y(NNR(J)):NZ(J,3)=Z(NNR(J))
690 REC(J,JJ)=REC(J,JJ)-(NZ(J,JJ)-NZ(1,JJ))*CDT
700 NTC=NTC-NX
710 NX=NX/10
720 NEXT JJ
730 NEXT J
740 RETURN
750 REM *****
760 REM *** SUBROTINA APOIO ***
770 REM *****
780 PRINT "ESTOU TORNANDO A MATRIZ DE RIGIDEZ NAO SINGULAR"
790 GRAN=10^15
800 FOR J=1 TO NUMNDRT
810 NX=10^(NDESNO-1)
820 I=NNR(J)
830 LL=(I-1)*NDESNO
840 FOR K=1 TO NDESNO
850 LL=LL+1
860 IP=P(LL)
870 A(IP)=A(IP)+REC(J,K)
880 IDA=NTC(J)/NX
890 IF IDA<.8 THEN 950
900 A(IP)=A(IP)+GRAN
910 FOR II=1 TO NC
920 F(LL,II)=A(IP)*REC(J,K)
930 NEXT II
940 NTC(J)=NTC(J)-NX
950 NX=NX/10
960 NEXT K
970 NEXT J
980 RETURN
990 REM *****
1000 REM *** SUBROTINA RESOL ***
1010 REM *****
1020 PRINT "ESTOU RESOLVENDO O SISTEMA DE EQUACOES"
1030 VMIN=10^(-20)
1040 IF A(1)<VMIN THEN PRINT "SUBROTINA NAO ADEQUADA PARA A RESOLUCAO DO SISTEMA DE EQUACOES"

```

```

1050 IF A(1)<VMIN THEN STOP
1060 A(1)=SQR(A(1))
1070 FOR J=2 TO NDESL
1080 H=P(J)-P(J-1)
1090 Q=P(J-1)+1
1100 R=J-H+1
1110 IF R=J THEN 1330
1120 A(Q)=A(Q)/A(P(R))
1130 KA=R+1
1140 FOR I=KA TO J
1150 Q=Q+1
1160 L=P(I)-P(I-1)
1170 S=I-L+1
1180 X=S
1190 IF R>S THEN X=R
1200 IF X>(I-1) THEN 1300
1210 QA=P(I)-I+X-1
1220 QAA=P(J)-J+X-1
1230 KB=I-1
1240 FOR K=X TO KB
1250 QA=QA+1
1260 QAA=QAA+1
1270 A(Q)=A(Q)-A(QA)*A(QAA)
1280 NEXT K
1290 IF I=J THEN 1330
1300 A(Q)=A(Q)/A(P(I))
1310 NEXT I
1320 REM *** TESTE DA MATRIZ POSITIVA DEFINIDA ***
1330 IF A(Q)<VMIN THEN PRINT "SUBROTINA NAO ADEQUADA PARA A RESOLUCAO DO SISTEMA DE EQUACOES"
1340 IF A(Q)<VMIN THEN STOP
1350 A(Q)=SQR(A(Q))
1360 NEXT J
1370 FOR J=1 TO NC
1380 F(1,J)=F(1,J)/A(1)
1390 NEXT J

```

```

1400 FOR I=2 TO NDESL
1410 H=P(I)-P(I-1)
1420 R=I-H+1
1430 FOR J=1 TO NC
1440 Q=P(I-1)
1450 AUX=F(I,J)
1460 IF R=I THEN 1520
1470 M=I-1
1480 FOR K=R TO M
1490 Q=Q+1
1500 AUX=AUX-A(Q)*F(K,J)
1510 NEXT K
1520 F(I,J)=AUX/A(P(I))
1530 NEXT J
1540 NEXT I
1550 FOR IA=2 TO NDESL
1560 I=NDESL-IA+2
1570 FOR J=1 TO NC
1580 F(I,J)=F(I,J)/A(P(I))
1590 NEXT J
1600 H=P(I)-P(I-1)
1610 R=I-H+1
1620 IF R=I THEN 1710
1630 Q=P(I-1)
1640 KC=I-1
1650 FOR K=R TO KC
1660 Q=Q+1
1670 FOR J=1 TO NC
1680 F(K,J)=F(K,J)-A(Q)*F(I,J)
1690 NEXT J
1700 NEXT K
1710 NEXT IA
1720 FOR J=1 TO NC
1730 F(1,J)=F(1,J)/A(1)
1740 NEXT J
1750 RETURN

```

```

10 REM *****
20 REM *** PROGRAMA D ***
30 REM *****
40 X1$=STRING$(80,42)
50 REM *** LEITURA DAS VARIAVEIS GRAVADAS NO DISCO ***
60 OPEN "I",1,"HELP1"
70 INPUT#1,CDT,TEMP,DU,NDESL,NNO,NDESL,NC,NS,NUMTES,NNOELM,NDEELM,NUMELEM,NUMSERE,NUMNDRT
80 INPUT#1,NAUX1,E,G,NOMEESTR$
90 CLOSE 1
100 DIM SMR(12,12),F(NDESL,NC),AM(NUMELEM,NDEELM),NDN(NUMELEM,NNOELM),R(NUMELEM,3,3)
110 DIM TIPOELEM$(NUMELEM),TIPOSECAO(NUMELEM),NNR(NUMNDRT),ARE(NAUX1),DESLOC(NDESL,NC)
120 DIM FP(NUMELEM),IIN(NUMELEM),IOUT(NUMELEM),NTC(NUMNDRT),X(NNO),Y(NNO),Z(NNO),XX(NUMELEM)
130 DIM YY(NUMELEM),ZZ(NUMELEM),RAIO(NUMELEM),ANGULO(NUMELEM),NDR(12),CG$(NUMELEM)
140 OPEN "I",1,"REC"
150 FOR K=1 TO NUMNDRT
160 FOR J=1 TO 6
170 INPUT#1,REC(K,J)
180 NEXT J
190 INPUT#1,NNR(K),NTC(K)
200 NEXT K
210 CLOSE 1
220 OPEN "I",1,"HELP2"
230 FOR K=1 TO NNO:INPUT#1,X(K),Y(K),Z(K):NEXT K
240 FOR K=1 TO NUMELEM:INPUT#1,XX(K),YY(K),ZZ(K):NEXT K
250 FOR K=1 TO NUMELEM:INPUT#1,TIPOELEM$(K),CG$(K):NEXT K
260 FOR K=1 TO NUMELEM:INPUT#1,RAIO(K),ANGULO(K),TIPOSECAO(K):NEXT K
270 FOR K=1 TO NUMELEM:FOR J=1 TO NNOELM:INPUT#1,NDN(K,J):NEXT J:NEXT K
280 FOR K=1 TO NUMSERE:INPUT#1,D(K),ESP(K),ZE(K),FC(K),AX(K),AR(K),IX(K),IY(K),IZ(K):NEXT K
290 FOR K=1 TO NUMTES:INPUT#1,PLANOTE$(K),NNOTE(K),TES(K),FIN(K),FOUT(K):NEXT K
300 CLOSE 1
310 OPEN "I",1,"HELP3"
320 FOR J=1 TO NUMELEM:INPUT#1,FP(J):NEXT J
330 FOR J=1 TO NDESL:FOR K=1 TO NC:INPUT#1,F(J,K):NEXT K:NEXT J
340 FOR J=1 TO NUMELEM:FOR K=1 TO 3:FOR L=1 TO 3:INPUT#1,R(J,K,L):NEXT L:NEXT K:NEXT J
350 CLOSE 1
360 REM *** CHAMA SUBROTINA QUE CORRIGE DESLOCAMENTOS ***
370 GOSUB 3130

```



```

380 REM *** IMPRESSAO DO CABECALHO E DADOS DO PROBLEMA ***
390 FOR I=1 TO 20:LPRINT:NEXT I
400 LPRINT TAB(25) X1$
410 GOSUB 3300
420 LPRINT TAB(25) "*" TAB(45) "UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO" TAB(104) "*"
430 GOSUB 3300
440 LPRINT TAB(25) "*" TAB(39) "COPPE - PROGRAMA DE ENGENHARIA CIVIL - ESTRUTURAS" TAB(104) "*"
450 GOSUB 3300
460 LPRINT TAB(25) "*" TAB(42) "PROGRAMA PARA CALCULO DE TENSOES SECUNDARIAS" TAB(104) "*"
470 GOSUB 3300
480 LPRINT TAB(25) "*" TAB(54) "EURICO DIAS RODRIGUES" TAB(104) "*":GOSUB 3300
490 LPRINT TAB(25) X1$
500 FOR J=1 TO 22:LPRINT:NEXT J
510 LPRINT "NOME DA ESTRUTURA - ";NOMEESTR$:LPRINT
520 LPRINT "NUMERO DE NOS - ";NNO
530 LPRINT "NUMERO DE ELEMENTOS - ";NUMELEM
540 LPRINT "NUMERO DE TIPOS DE TUBO - ";NUMSERE
550 LPRINT "NUMERO DE NOS COM DIRECOES RESTRINGIDAS - ";NUMNDRT
560 LPRINT "NUMERO DE TES - ";NUMTES
570 LPRINT "MODULO DE ELASTICIDADE (daN/mm2) - ";E
580 LPRINT "TEMPERATURA DE TRABALHO (graus C) - ";TEMP
590 LPRINT "DILATACAO UNITARIA (1/graus C) - ";DU:LPRINT:LPRINT
600 LPRINT "COORDENADAS DOS NOS (mm)":LPRINT STRING$(24,42)
610 LPRINT " NO      X      Y      Z"
620 FOR K=1 TO NNO
630 LPRINT K;:LPRINT TAB(7) X(K) TAB(14) Y(K) TAB(21) Z(K)
640 NEXT K
650 LPRINT:LPRINT:LPRINT"MATRIZ DE INCIDENCIA":LPRINT STRING$(20,42)
660 LPRINT "ELEMENTO      INI      FIN      SECAO      TIPO"
670 FOR K=1 TO NUMELEM
680 LPRINT TAB(4) K TAB(15) NDN(K,1) TAB(25) NDN(K,2) TAB(35) TIPOSECAO(K) TAB(46) TIPOELEM$(K)
690 NEXT K

```

```

700 LPRINT:LPRINT:LPRINT "DESLOCAMENTOS PRESCRITOS NOS APOIOS RESTRINGIDOS (mm e rad)"
710 LPRINT STRING$(59,62)
720 LPRINT " NO      DX      DY      DZ      TX      TY      TZ"
730 FOR K=1 TO NUMNDRT
740 LPRINT NNR(K);:FOR J=1 TO 6:LPRINT TAB(9*KJ-1) REC(K,J);:NEXT J
750 LPRINT " "
760 NEXT K
770 LPRINT:LPRINT
780 LPRINT "CARACTERISTICAS GEOMETRICAS (mm)"
790 LPRINT STRING$(32,42)
800 LPRINT "SECAO  DIAMETRO  ESPESSURA"
810 FOR K=1 TO NUMSERE
820 LPRINT TAB(2) K TAB(10) D(K) TAB(21) ESP(K)
830 NEXT K
840 LPRINT:LPRINT
850 REM *** CHAMA SUBROTINA QUE IMPRIME DESLOCAMENTOS E ESFORCOS ***
860 GOSUB 1110
870 REM *** CHAMA SUBROTINA QUE IMPRIME REACOES DE APOIO ***
880 GOSUB 1770
890 REM *** CHAMA SUBROTINA QUE CALCULA TENSOES NOS ELEMENTOS ***
900 GOSUB 2140
910 LPRINT "CARACTERISTICAS DAS CURVAS":LPRINT STRING$(26,42)
920 LPRINT "ELEMENTO  RAIO(mm)  ANGULO  TIPO  XX(mm)  YY(mm)  ZZ(mm)  FATOR FLEX.";
930 LPRINT " FITIN  FITOUT"
940 FOR I=1 TO NUMELEM
950 IF TIPOELEM$(I) <> "CUR" THEN 1020
960 ANGULO=INT(ANGULO(I)*180/3.14159+.5)
970 IF CG$(I)="N" THEN CG$="NORMAL" ELSE CG$=" GOMOS"
980 LPRINT TAB(4) I TAB(12) RAIO(I) TAB(24) ANGULO TAB(31) CG$ TAB(39) XX(I) TAB(47) YY(I);
990 LPRINT TAB(55) ZZ(I) TAB(66) "":LPRINT USING "##.##";FP(I);
1000 LPRINT TAB(77) "":LPRINT USING "##.##";IIN(I);:LPRINT TAB(85) " ";

```

```

1010 LPRINT USING "##.##"; IOUT(I)
1020 NEXT I
1030 LPRINT:LPRINT
1040 IF NUMTES=0 THEN 1070
1050 REM *** CHAMA SUBROTINA QUE INTENSIFICA TENSOES EM TES ***
1060 GOSUB 2260
1070 LPRINT:LPRINT:LPRINT "TENSAO MAXIMA DE";:LPRINT USING "###.##"; TEMAX;
1080 LPRINT " daN/mm2 NO ELEMENTO"; NELEM
1090 LPRINT STRING$(50,42)
1100 END
1110 REM *****
1120 REM *** SUBROTINA ESFOR ***
1130 REM *****
1140 PRINT '1,1' BLANK
1150 LPRINT "DESLOCAMENTOS DOS NOS (mm e rad)"
1160 LPRINT STRING$(32,42)
1170 LPRINT " NO          DESLOC X          DESLOC Y          DESLOC Z          ROTACAO X          ROTACAO Y";
1180 LPRINT "          ROTACAO Z"
1190 FOR J=1 TO NNO
1200 LPRINT J;
1210 JJ=(J-1)*NDESNO
1220 FOR KJ=1 TO NDESNO
1230 LPRINT TAB(15*KJ-5) " ";
1240 LPRINT USING "###.#####"; DESLOC(JJ+KJ,NC);
1250 NEXT KJ
1260 LPRINT " "
1270 NEXT J
1280 LPRINT:LPRINT
1290 LPRINT "ESFORCOS NAS EXTREMIDADES DOS ELEMENTOS NO SISTEMA LOCAL (daN)
1300 LPRINT STRING$(62,42)
1310 LPRINT "ELEMENTO          FxD          FyD          FzD          FxE          FyE          FzE"
1320 OPEN "I",1,"SMR"
1330 FOR I=1 TO NUMELEM
1340 FOR KK=1 TO NDEELM
1350 FOR JJ=1 TO NDEELM
1360 INPUT#1,SMR(JJ,KK)
1370 NEXT JJ:NEXT KK

```

```

1380 K=0
1390 FOR J=1 TO 2
1400 FOR JK=1 TO NDESNO
1410 K=K+1
1420 NDIR(K)=NDESNO*(NDN(I,J)-J)+K
1430 NEXT JK
1440 NEXT J
1450 FOR K=1 TO NDEELM
1460 AM(I,K)=0
1470 NEXT K
1480 FOR K=1 TO NDEELM
1490 FOR J=1 TO NDEELM
1500 AM(I,K)=AM(I,K)+SMR(K,J)*F(NDIR(J),NC)
1510 NEXT J
1520 NEXT K
1530 LPRINT TAB(4) I;
1540 FOR K=1 TO 6
1550 LPRINT TAB(10*K-2) " ";
1560 IF K>3 THEN LPRINT USING "#####";AM(I,K+3); ELSE 1580
1570 GOTO 1590
1580 LPRINT USING "#####";AM(I,K);
1590 NEXT K
1600 LPRINT " "
1610 NEXT I
1620 CLOSE 1
1630 LPRINT:LPRINT:LPRINT "MOMENTOS NAS EXTREMIDADES DOS ELEMENTOS NO SISTEMA LOCAL (daN.mm)"
1640 LPRINT STRING$(65,42)
1650 LPRINT "ELEMENTO      MxD      MyD      MzD      MxE      MyE      MzE"
1660 FOR I=1 TO NUMELEM
1670 LPRINT TAB(4) I;
1680 FOR K=1 TO 6
1690 LPRINT TAB(11*K-2) " ";
1700 IF K>3 THEN LPRINT USING "#####";AM(I,K+6); ELSE 1720
1710 GOTO 1730
1720 LPRINT USING "#####";AM(I,K+3);
1730 NEXT K
1740 NEXT I
1750 LPRINT:LPRINT
1760 RETURN

```

```

1770 REM *****
1780 REM *** SUBROTINA REAPO ***
1790 REM *****
1800 FOR K=1 TO NAUX1
1810 ARE(K)=0
1820 NEXT K
1830 FOR I=1 TO NUMELEM
1840 FOR J=1 TO NUMNDRT
1850 JJ=NDESNO*(J-1)
1860 IF NNR(J) <> NDN(I,1) THEN 1920
1870 FOR JK=1 TO 3
1880 FOR KK=1 TO 3
1890 ARE(JJ+JK)=ARE(JJ+JK)+R(I,KK,JK)*AM(I,KK)
1900 ARE(JJ+JK+3)=ARE(JJ+JK+3)+R(I,KK,JK)*AM(I,KK+3)
1910 NEXT KK:NEXT JK
1920 IF NNR(J) <> NDN(I,2) THEN 1980
1930 FOR JK=1 TO 3
1940 FOR KK=1 TO 3
1950 ARE(JJ+JK)=ARE(JJ+JK)+R(I,KK,JK)*AM(I,KK+6)
1960 ARE(JJ+JK+3)=ARE(JJ+JK+3)+R(I,KK,JK)*AM(I,KK+9)
1970 NEXT KK:NEXT JK
1980 NEXT J
1990 NEXT I
2000 PRINT '1,1' BLANK
2010 LPRINT "REACOES DE APOIO (daN e daN.mm)"
2020 LPRINT STRING$(31,42)
2030 LPRINT " NO          FX          FY          FZ          MX          MY          MZ"
2040 FOR J=1 TO NUMNDRT
2050 JJ=NDESNO*(J-1)
2060 LPRINT NNR(J);
2070 FOR JK=1 TO NDESNO
2080 LPRINT TAB(11*JK-6) " ";
2090 LPRINT USING "#####";ARE(JJ+JK);
2100 NEXT JK
2110 LPRINT " "
2120 NEXT J
2130 RETURN

```

```

2140 REM *****
2150 REM *** SUBROTINA TENSOES ***
2160 REM *****
2170 LPRINT:LPRINT:LPRINT "TENSOES NOS ELEMENTOS (daN/mm2)":LPRINT STRING$(31,42)
2180 LPRINT"ELEMENTO          SIGMAd          SIGMAe"
2190 FOR I=1 TO NUMELEM
2200 IF TIPOELEM$(I)="RET" THEN GOSUB 2680:GOTO 2230
2210 IF TIPOELEM$(I)="CUR" THEN GOSUB 2820:GOTO 2230
2220 IF TIPOELEM$(I)="INF" THEN GOSUB 3070
2230 NEXT I
2240 LPRINT:LPRINT
2250 RETURN
2260 REM *****
2270 REM *** SUBROTINA TENTES ***
2280 REM *****
2290 LPRINT:LPRINT:LPRINT "TENSOES INTENSIFICADAS NOS TES (daN/mm2)"
2300 LPRINT STRING$(40,42):LPRINT " NO      TE      ELEMENTO      TENSAO      FITIN      FITOUT"
2310 FOR K=1 TO NUMTES
2320 FOR I=1 TO NUMELEM
2330 IF NDN(I,1)<>NNOTE(K) THEN 2490
2340 MTOR=AM(I,4)
2350 IF TE$(K)="N" THEN 2370
2360 GOSUB 3320
2370 IF PLANOTE$(K)<>"XY" THEN 2390
2380 MIN=AM(I,6):MOUT=AM(I,5):GOTO 2480
2390 IF PLANOTE$(K)<>"XZ" THEN 2410
2400 MIN=AM(I,5):MOUT=AM(I,6):GOTO 2480
2410 IF PLANOTE$(K)<>"XZ" THEN 2450
2420 IF R(I,1,2)<>0 THEN 2440
2430 MIN=AM(I,5):MOUT=AM(I,6):GOTO 2480
2440 MIN=AM(I,6):MOUT=AM(I,5):GOTO 2480
2450 IF PLANOTE$(K)<>"QQ" THEN 2470
2460 FIN(K)=FOUT(K):MIN=AM(I,5):MOUT=AM(I,6):GOTO 2480
2470 PRINT "DESIGNACAO DE PLANO DE TE ESTA ERRADA":STOP
2480 GOSUB 3400

```

```

2490 IF NDN(I,2)<>NNOTE(K) THEN 2640
2500 MTOR=AM(I,10)
2510 IF TES(K)="N" THEN 2530
2520 GOSUB 3320
2530 IF PLANOTES(K)<>"XY" THEN 2550
2540 MIN=AM(I,12):MOUT=AM(I,11):GOTO 2630
2550 IF PLANOTES(K)<>"XZ" THEN 2570
2560 MIN=AM(I,11):MOUT=AM(I,12):GOTO 2630
2570 IF PLANOTES(K)<>"YZ" THEN 2610
2580 IF R(I,1,2)<>0 THEN 2600
2590 MIN=AM(I,11):MOUT=AM(I,12):GOTO 2630
2600 MIN=AM(I,12):MOUT=AM(I,11):GOTO 2630
2610 IF PLANOTES(K)<>"QQ" THEN 2470
2620 FIN(K)=FOUT(K):MIN=AM(I,11):MOUT=AM(I,12):GOTO 2630
2630 GOSUB 3400
2640 NEXT I
2650 LPRINT
2660 NEXT K
2670 RETURN
2680 REM *****
2690 REM *** SUBROTINA QUE CALCULA E IMPRIME TENSOES EM ELEMENTOS RETOS ***
2700 REM *****
2710 ZE=ZE(TIPOSECAO(I))
2720 FOR K=1 TO 2
2730 ST(K)=AM(I,6*K-2)/(2*ZE)
2740 SB(K)=SQR(AM(I,6*K-1)^2+AM(I,6*K)^2)/ZE
2750 SE(K)=SQR(4*ST(K)^2+SB(K)^2)
2760 IF TEMAX>SE(K) THEN 2780
2770 TEMAX=SE(K):NELEM=I
2780 NEXT K
2790 LPRINT TAB(4) I TAB(18) "":LPRINT USING "###.##";SE(1);LPRINT TAB(34) "":
2800 LPRINT USING "###.##";SE(2)
2810 RETURN

```

```

2820 REM *****
2830 REM *** SUBROTINA QUE CALCULA E IMPRIME TENSOES EM ELEMENTOS CURVOS ***
2840 REM *****
2850 K=TIPOSECAO(I)
2860 AGA=ESP(K)*RAIO(I)/((D(K)-ESP(K))/2)^2
2870 IIN=.9/AGA^.6667
2880 IOUT=IIN*.833
2890 IF CG$(I)<>"S" THEN 2940
2900 PRINT '1,1' BLANK:PRINT "ELEMENTO ";I
2910 PRINT '4,1' "Fator de intensificacao de tensoes no plano da curva ";:INPUT FITIN
2920 PRINT "Fator de intensificacao de tensoes fora do plano da curva ";:INPUT FITOUT
2930 IIN=FITIN:IOUT=FITOUT
2940 IIN(I)=IIN:IOUT(I)=IOUT:FI=ANGULO(I):SF2=SIN(FI/2):CF2=COS(F/2)
2950 ST(1)=(AM(I,4)*CF2+AM(I,5)*SF2)/(2*ZE(K))
2960 ST(2)=(AM(I,10)*CF2-AM(I,11)*SF2)/(2*ZE(K))
2970 SB(1)=SQR((IOUT*(AM(I,5)*CF2-AM(I,4)*SF2))^2+(IIN*AM(I,6))^2)/ZE(K)
2980 SB(2)=SQR((IOUT*(AM(I,11)*CF2+AM(I,10)*SF2))^2+(IIN*AM(I,12))^2)/ZE(K)
2990 FOR K= 1 TO 2
3000 SE(K)=SQR(4*ST(K)^2+SB(K)^2)
3010 IF TEMAX>SE(K) THEN 3030
3020 TEMAX=SE(K):NELEM=I
3030 NEXT K
3040 LPRINT TAB(4) I TAB(18) "":LPRINT USING "###.##";SE(1);:LPRINT TAB(34) "":
3050 LPRINT USING "###.##";SE(2)
3060 RETURN
3070 REM *****
3080 REM *** SUBROTINA PARA IMPRIMIR "ELEMENTO INFLEXIVEL" ***
3090 REM *****
3100 LPRINT TAB(4) I TAB(12) "E L E M E N T O      I N F L E X I V E L"
3110 RETURN
3120 REM *****
3130 REM *** SUBROTINA PARA CORRIGIR OS DESLOCAMENTOS ***
3140 REM *****
3150 FOR K=1 TO NDESL
3160 FOR J=1 TO NC
3170 DESLOC(K,J)=F(K,J)
3180 NEXT J
3190 NEXT K

```



```

3200 FOR J=1 TO NNO
3210 LL=(J-1)*NDESNO + 1
3220 FOR II=1 TO NC
3230 DESLOC(LL,II)=F(LL,II) + (X(J)-X(1))*CDT
3240 DESLOC(LL+1,II)=F(LL+1,II) + (Y(J)-Y(1))*CDT
3250 DESLOC(LL+2,II)=F(LL+2,II) + (Z(J)-Z(1))*CDT
3260 NEXT II
3270 NEXT J
3280 RETURN
3290 REM *** SUBROTINA PARA COMPLETAR O CABECALHO ***
3300 LPRINT TAB(25) "*" TAB(104) "":RETURN
3310 REM *****
3320 REM *** SUBROTINA PARA CALCULAR FIN E FOUT DE CURVAS NORMAIS ***
3330 REM *****
3340 KK=TIPOSECAO(I)
3350 AGA=8.8*ESP(KK)/(D(KK)-ESP(KK))
3360 FOUT(K)=.9/AGA^.6667
3370 FIN(K)=.75*FOUT(K)+.25
3380 RETURN
3390 REM *****
3400 REM *** SUBROTINA PARA CALCULAR TENSOES NOS TES ***
3410 REM *****
3420 ZE=ZE(TIPOSECAO(I))
3430 ST=MTOR/(2*ZE)
3440 SB=SQR((FIN(K)*MIN)^2+(FOUT(K)*MOUT)^2)/ZE
3450 SE=SQR(4*ST^2+SB^2)
3460 IF TEMAX > SE THEN 3480
3470 TEMAX=SE:NELEM=I
3480 LPRINT NNOTE(K) TAB(7) K TAB(16) I TAB(25) "":LPRINT USING "###.##";SE;:LPRINT TAB(34) "":
3490 LPRINT USING"###.##";FIN(K);:LPRINT TAB(42) "":LPRINT USING "###.##";FOUT(K)
3500 RETURN

```

## SIMBOLOGIA

- $\sigma_t$  - Tensão máxima no primeiro ciclo de trabalho  
 $M_b$  - Momento fletor no plano da estrutura  
 $M_{bt}$  - Momento fletor perpendicular ao  $M_b$   
 $K$  - Fator de flexibilidade  
 $E_n$  - Módulo de elasticidade  
 $G_n$  - Módulo transversal de elasticidade  
 $I_n$  - Momento de inércia da seção transversal  
 $J_n$  - Momento de inércia polar  
 $Q$  - Coeficiente de rigidez  
 $e$  - Dilatação unitária linear correspondente a uma variação de temperatura  
 $S_E$  - Tensão efetiva  
 $Z$  - Módulo de resistência  
 $S_R$  - Tensão radial  
 $S_L$  - Tensão longitudinal  
 $S_C$  - Tensão circunferencial ou tangencial  
 $\tau$  - Tensões cisalhantes  
 $p_i$  - pressão interna  
 $\sigma_R$  - Tensão de ruptura  
 $S_{ADM}$  - Tensão admissível  
 $E$  - Módulo de elasticidade do material  
 $D_o$  - Diâmetro externo do tubo  
 $D_i$  - Diâmetro interno do tubo  
 $D_n$  - Diâmetro nominal do tubo  
 $t_n$  - Espessura nominal do tubo

- U - Distância entre ancoragens
- TF - Tolerância de fabricação
- c - sobreespessura para corrosão
- $S_t$  - Tensão resultante do momento torsor
- $S_b$  - Tensão resultante dos momentos fletores
- $M_i$  - Momento fletor no plano da estrutura
- $M_o$  - Momento fletor fora do plano da estrutura
- $M_t$  - Momento torsor
- $i_i$  - Fator de intensificação de tensões no plano da estrutura
- $i_o$  - Fator de intensificação de tensões fora do plano da estrutura
- $S_A$  - Tensão admissível às tensões secundárias
- $S_c$  - Tensão admissível básica a frio
- $S_h$  - Tensão admissível básica a quente
- h - Fator característico de flexibilidade
- $\bar{T}$  - Espessura nominal da curva ou do tê
- $R_1$  - Raio da curva
- $r_2$  - Raio médio
- s - Espaçamento da curva em gomos
- $t_r$  - Espessura do reforço ou da tela
- $r_x$  - Raio da parte curva do tê

## BIBLIOGRAFIA

- (1) AMERICAN NATIONAL STANDARD CODE FOR PRESSURE PIPING, "Chemical Plant and Petroleum Refinery", ANSI B 31.3, New York, 1976
- (2) PETRÓLEO BRASILEIRO S. A., "Tubulação - Critério de Cálculo mecânico", N-1673, Rio de Janeiro, 1985
- (3) KELLOG COMPANY, "Design of Piping Systems", New York, 1965
- (4) TELLES, P.C.S., "Tubulações Industriais - Cálculo", Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 6ª edição, 1982
- (5) TELLES, P.C.S. e BARROS, D.G.P., "Tabelas e Gráficos para Projetos de Tubulações", Editora Interciência, 2ª edição, 1978
- (6) PETRÓLEO BRASILEIRO S. A., "Vão Máximo entre Suportes de Tubulações", N-46A, Rio de Janeiro, 1985
- (7) TIMOSHENKO, S.P. e GERE, J.M., "Mechanics of Materials", Van Nostrand Co., 1972
- (8) WEAVER J.W., "Computer Programs for Structural Analysis", Van Nostrand Co., 1967
- (9) SORIANO, H.L., "Análise de Estruturas Reticuladas em Computadores de Pequeno Porte", publicação COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1983
- (10) ARAÚJO, E.R., "Um programa para cálculo automático estático e dinâmico de sistemas de tubulações", publicação da COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1978